

**UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE**

**Faculté d'ingénierie**

**Département de génie mécanique**

**ANALYSE DU COMPORTEMENT THERMIQUE D'UNE SERRE MUNIE  
D'UN SYSTEME DE STOCKAGE DE CHALEUR SOUTERRAIN**

**Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées**

**Spécialité : génie mécanique**

**Patrick JOLY**

**Sherbrooke (Québec)**

**Mai 2000**

## SOMMAIRE

Afin de mieux gérer la consommation énergétique des serres agricoles québécoises, le projet ÉCHAS fut mis sur pied au sein du groupe de recherche THERMAUS du département de génie mécanique de l'Université de Sherbrooke.

Ceci est la dernière phase du projet ÉCHAS (ÉCHangeur-Accumulateur de chaleur dans le Sol des serres). Ce projet vise à mieux comprendre la dynamique thermique des serres québécoises et à analyser leur comportement thermique lorsqu'elles sont munies d'un système de stockage de chaleur dans le sol de type ÉCHAS.

Tout d'abord, la modélisation de la serre sur le logiciel commercial TRNSYS et la modélisation du sol et de l'ÉCHAS sur un code numérique développé pour le projet (baptisé Biko) sont exposés. Ces modèles sont validés par des données expérimentales et par la comparaison de leur réponse avec d'autres modèles connus.

L'union de ces deux modèles permet de faire des simulations numériques de différents systèmes serres-ÉCHAS, selon leur localité géographique, leur stratégie d'exploitation (températures de confort, intégration à la ventilation normale à celle de l'ÉCHAS), et la construction de l'ÉCHAS (isolation, nombre de conduits, sol humide ou saturé, etc.).

Les résultats montrent que l'ÉCHAS peut être très performant (très bon ratio énergie stockée sur énergie récupérée) et efficace (bonne économie de chauffage et d'énergie) selon sa construction et son exploitation. Il peut facilement permettre des économies de chauffage de l'ordre de 15-20%.

## **REMERCIEMENTS**

À prime abord, je tiens à remercier mon directeur de recherche, le professeur Marcel Lacroix. Sans son côté humain, son sens de l'efficacité et sa flexibilité, le succès de ma maîtrise aurait été sérieusement compromis.

Je tiens à souligner mon grand respect professionnel envers Carol Gauthier et Patrick Lemay, les deux premiers acteurs du projet ÉCHAS. Leurs travaux, riches en quantité et en qualité, m'ont été transmis avec souci et disponibilité. Aussi, nous avons tous été très bien appuyés et informés par Jean-Marc Boudreault du CIDES de Sainte-Hyacinthe et Hervé Bernier de l'ITA-La Pocatière; je tiens à souligner notre reconnaissance envers eux.

De plus, je remercie Daniel Maltais du ministère des ressources naturelles du Québec pour la subvention du projet, le département de génie mécanique de l'Université de Sherbrooke pour son aide financière et le fonds FCAR pour la bourse d'études dans la catégorie « énergie » qu'ils m'ont octroyée.

Finalement, j'aimerais exprimer ma gratitude envers ma famille et mes amis qui ont toujours cru en moi et en mes capacités de mener à terme ce projet de maîtrise. Leurs encouragements m'ont permis de garder mes objectifs en vue.

## TABLE DES MATIÈRES

1.	INTRODUCTION.....	1
1.1	<b>Problématique.....</b>	1
2.	REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....	4
2.1	<b>Systèmes de stockage de chaleur pour les serres.....</b>	4
2.2	<b>Code numérique pour le transfert de chaleur dans le sol .....</b>	6
2.3	<b>Modèle des échanges thermiques dans une serre.....</b>	6
3.	DÉFINITION DU PROBLÈME À ÉTUDIER.....	8
4.	MODÉLISATION DE LA SERRE ET DU SYSTÈME DE STOCKAGE.....	9
4.1	<b>Caractéristiques de la serre.....</b>	9
4.2	<b>Modèle de la serre.....</b>	10
4.3	<b>Modèle du système de stockage dans le sol.....</b>	12
4.4	<b>Validation des modèles.....</b>	18
4.4.1	<u>Modèle de la serre, sur TRNSYS.....</u>	18
4.4.2	<u>Modèle du sol et de l'ÉCHAS sur Biko.....</u>	20
4.5	<b>Couplage des modèles de la serre et du système de stockage de chaleur dans le sol..</b>	23
4.6	<b>Exploitation du modèle global serre-sol.....</b>	25
4.6.1	<u>Le chauffage et la ventilation.....</u>	25
4.6.2	<u>Le système ÉCHAS.....</u>	26
5.	LES SYSTÈMES SIMULÉS.....	28
5.1	<b>Besoin en chauffage de serres typiques.....</b>	28
5.2	<b>Configuration des systèmes ÉCHAS étudiés.....</b>	31
5.2.1	<u>L'ÉCHAS étendu.....</u>	32
5.2.2	<u>La tranchée isolée.....</u>	34



6.	<b>RÉSULTATS ET DISCUSSION.....</b>	<b>37</b>
6.1	<b>Observations générales.....</b>	<b>37</b>
6.2	<b>L'ÉCHAS étendu.....</b>	<b>38</b>
6.2.1	<u>Influence du climat extérieur.....</u>	<u>39</u>
6.2.2	<u>Influence des températures d'exploitation de la serre.....</u>	<u>40</u>
6.2.3	<u>Influence de l'isolation du dessous de l'ÉCHAS.....</u>	<u>41</u>
6.3	<b>L'ÉCHAS en tranchée isolée.....</b>	<b>42</b>
6.4	<u>Variations de la tranchée.....</u>	<u>44</u>
6.4	<b>L'ÉCHAS intégré à la ventilation normale de la serre.....</b>	<b>46</b>
6.5	<b>Le COP de l'ÉCHAS.....</b>	<b>48</b>
6.6	<b>L'efficacité de l'ÉCHAS dans le temps.....</b>	<b>49</b>
6.7	<b>La panne de chauffage.....</b>	<b>51</b>
7.	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>54</b>
	<b>ANNEXE A.....</b>	<b>57</b>
	<b>ANNEXE B.....</b>	<b>75</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>84</b>

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1:	Principe du stockage de chaleur dans le sol.....	3
Figure 2.1:	Système ÉCHAS installé à l'ITA de La Pocatière.....	5
Figure 4.1:	Schéma de la serre avec dimensions.....	9
Figure 4.2:	Modélisation de la serre comme un seul noeud.....	10
Figure 4.3:	Représentation des plans X-Y et Z-Y du volume de contrôle discrétisé dans le sol.....	16
Figure 4.4:	Discrétisation du volume de contrôle du conduit dans le sol.....	17
Figure 4.5:	Comparaison du bilan de chauffage mensuel d'une serre selon deux modèles.....	20
Figure 4.6:	Différence de température prédite et mesurée entre l'entrée et la sortie d'un conduit.....	22
Figure 4.7:	Relation entre le modèle de la serre et le modèle du sol.....	25
Figure 5.1:	Modélisation du sol.....	30
Figure 5.2:	Représentation de l'ÉCHAS étendu.....	32
Figure 5.3:	Modèle de l'ÉCHAS étendu.....	34
Figure 5.4 :	Vue en coupe de l'ÉCHAS en tranchée isolée (configuration T0).....	35
Figure 6.1:	Schéma d'un ÉCHAS en tranchée isolée sous une serre.....	43
Figure 6.2:	Énergie transférée quotidiennement à la serre par l'ÉCHAS.....	50
Figure 6.3:	Température de la serre en fonction du temps lors d'une panne de chauffage.....	52

## **LISTE DES TABLEAUX**

<b>TABLEAU 2.1:</b>	<b>ÉCONOMIES DE CHAUFFAGE ATTRIBUABLES À DIFFÉRENTS MODES DE STOCKAGE.....</b>	<b>4</b>
<b>TABLEAU 5.1:</b>	<b>DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES MENSUELLES MOYENNES DES 3 RÉGIONS ÉTUDIÉES.....</b>	<b>29</b>
<b>TABLEAU 5.2:</b>	<b>PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DU SOL ET DE LA FONDATION ISOLÉE.....</b>	<b>30</b>
<b>TABLEAU 5.3:</b>	<b>BESOINS EN CHAUFFAGE D'UNE SERRE TYPIQUE, SANS ÉCHAS, DU 1<sup>ER</sup> FÉVRIER AU 31 OCTOBRE, POUR DIFFÉRENTES TEMPÉRATURES DE CONFORT.....</b>	<b>31</b>
<b>TABLEAU 5.4:</b>	<b>CARACTÉRISTIQUES DES ÉCHAS EN TRANCHÉE ISOLÉE.....</b>	<b>36</b>
<b>TABLEAU 6.1:</b>	<b>INFLUENCE DU CLIMAT SUR LA PERFORMANCE D'UN ÉCHAS ÉTENDU.....</b>	<b>39</b>
<b>TABLEAU 6.2:</b>	<b>INFLUENCE DES TEMPÉRATURES DE CONFORT SUR LA PERFORMANCE D'UN ÉCHAS ÉTENDU.....</b>	<b>40</b>
<b>TABLEAU 6.3:</b>	<b>INFLUENCE DE L'ISOLATION DU DESSOUS D'UN ÉCHAS SUR L'ÉCONOMIE D'ÉNERGIE.....</b>	<b>41</b>
<b>TABLEAU 6.4:</b>	<b>ÉCONOMIES RÉALISÉES AVEC UN ÉCHAS EN TRANCHÉE (T0).....</b>	<b>43</b>
<b>TABLEAU 6.5:</b>	<b>ÉCONOMIES RÉALISÉES AVEC DIFFÉRENTS TYPES D'ÉCHAS EN TRANCHÉE.....</b>	<b>45</b>
<b>TABLEAU 6.6:</b>	<b>INFLUENCE DE L'INTÉGRATION DE L'ÉCHAS (T0) À LA VENTILATION NORMALE DE LA SERRE.....</b>	<b>46</b>
<b>TABLEAU 6.7:</b>	<b>COP DE DIFFÉRENTS ÉCHAS SUR 9 MOIS DE SERRICULTURE....</b>	<b>48</b>

## 1. INTRODUCTION

### 1.1 Problématique

Les serres agricoles ont prouvé leur valeur face à la demande croissante de production maraîchère et ornementale en facilitant la culture hors saison, en protégeant les plants des mauvaises conditions climatiques et en permettant la culture de certaines espèces à des endroits où cela fut jadis impossible.

Dans les régions plus nordiques, la culture en serre sert surtout à prolonger la saison cultivable de certaines espèces au delà des quelques mois d'été existants. Cela ne se fait pas sans investir de l'argent en chauffage afin de maintenir une certaine température de confort dans la serre lors des nuits plus fraîches.

Au Québec, environ 25% des frais variables d'exploitation de plus de 1300 entreprises serricoles sont imputables au chauffage et ils représentent une sérieuse menace à la viabilité économique de cette industrie [1].

En effet, la nature même des serres fait en sorte qu'il y a un excès de chaleur dans celles-ci le jour et on doit l'évacuer; ceci se traduit par une perte d'énergie. La nuit, l'absence de rayonnement solaire, la faible isolation et la faible masse thermique des serres oblige les serriculteurs à chauffer celles-ci, surtout au printemps et à l'automne; ceci se traduit par une consommation d'énergie. C'est cette consommation d'énergie qui entraîne des coûts d'exploitation élevés à nos serriculteurs, contrairement à ceux des régions plus clémentes (Ontario, U.S.A., Mexique, Israël, etc.).

Avec la venue des accords de libre échange et de la globalisation des marchés, si l'industrie serricole québécoise veut être compétitive afin de survivre, elle doit diminuer sa consommation énergétique de chauffage durant les périodes plus froides de l'année, que l'on chiffre à 111 GWh par année [2].

Pour remédier à cette situation, le groupe THERMAUS du département de génie mécanique, en collaboration avec le Ministère des ressources naturelles du Québec, l'Institut de technologie agro-alimentaire de La Pocatière et le Centre d'information et de développement expérimental en serriculture (CIDES) de Sainte-Hyacinthe a entrepris des travaux de recherche visant à réduire et à mieux gérer la consommation d'énergie pour le chauffage des serres.

Plusieurs systèmes de stockage de chaleur sont connus et utilisés aujourd'hui à travers le monde (réservoirs d'eau, matériaux à changement de phase, lit de pierres concassées, mur de Trombe, etc.). Par contre, pour qu'un système soit adopté par nos serriculteurs, en plus d'être peu coûteux, il doit être simple d'installation et d'utilisation et ne doit pas occuper d'espace dans la serre qui pourrait être utilisé pour les cultures [3]. Le système répondant le mieux à ces critères et qui est déjà connu consiste à utiliser le sol sous la serre comme masse thermique en faisant circuler l'air de la serre dans un réseau de conduits de PVC (conduits de drainage non perforés conventionnels) enfouis dans le sol. Le jour, l'air chaud cède sa chaleur au sol; la nuit, l'air plus frais de la serre récupère la chaleur cédée au sol pendant le jour (voir Figure 1.1). Quoique déjà connu et utilisé, ce système n'a jamais été analysé en tenant compte de **tous** les facteurs pouvant influencer son fonctionnement (caractère tridimensionnel de l'ensemble, échanges avec les conditions thermiques variables de la serre, présence d'isolation et de fondation autour du système, etc.) autre que par des mesures expérimentales sur des systèmes existants. Ceci empêche de pouvoir adapter les résultats à tout type et à toute localisation de serre.

De là est né le projet ÉCHAS (ÉCHangeur-Accumulateur de chaleur dans le Sol) à l'automne 1994, qui a pour but de modéliser numériquement et de simuler le comportement thermique de serres munies d'un système de stockage de chaleur dans le sol afin, de calculer son efficacité énergétique et de faire des recommandations précises aux serriculteurs quant à la configuration et l'utilisation de tels systèmes. Jusqu'à maintenant un modèle mathématique de stockage de chaleur dans le sol a été développé au groupe THERMAUS [4]. Un modèle du comportement thermique de la serre a aussi été développé et mis au point [5].

Nous en sommes donc à la phase finale de ce projet, à savoir la simulation d'un système de stockage de chaleur dans le sol couplé au modèle de la serre. Tel est le sujet des travaux de recherche de la présente maîtrise.

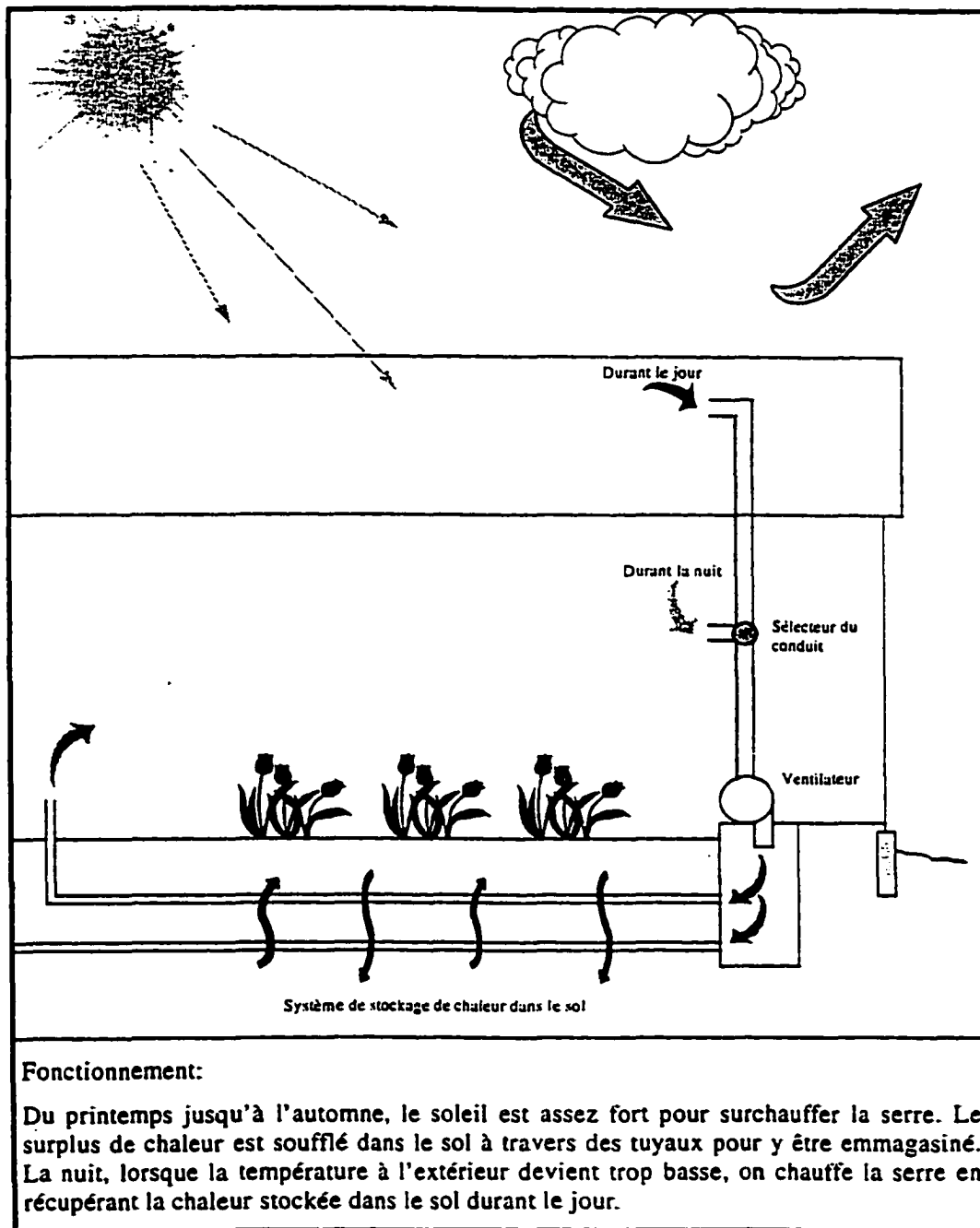


Figure 1.1 : Principe du stockage de chaleur dans le sol

## 2. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

### 2.1 Systèmes de stockage de chaleur pour les serres

Santamouris et al. [6] ont classifié tous les systèmes et technologies passifs utilisés pour des fins de chauffage dans les serres. Ils ont recensé ces technologies en cinq catégories et ont compilé leur efficacité en égard des données expérimentales obtenues de plusieurs dizaines de serres à travers le monde. Le tableau suivant résume leurs principales conclusions.

TABLEAU 2.1 : ÉCONOMIES DE CHAUFFAGE ATTRIBUABLES À DIFFÉRENTS MODES DE STOCKAGE

Technologie	Masses d'eau	Matériaux à changement de phase	Lit de cailloux	Réseau de conduits enfouis	Autres types
Nombre de serres recensées	40	11	14	18	12
Économie de chauffage annuelle	20% - 75%	20% - 75%	20% - 70%	30% - 60%	14% - 82%

Ces premières constatations nous permettent de voir que les rendements des différents modes de stockage se ressemblent beaucoup et surtout, sont très variables. Donc, pour faire le choix d'un système de stockage de chaleur, on se penchera sur d'autres critères tout aussi importants que l'économie de chauffage : un coût peu élevé d'achat et d'exploitation, un très bon rendement potentiel et l'absence d'encombrement dans la serre [3]. Face à cela, le concept de conduits enfouis dans le sol est le meilleur choix et justifie pleinement l'effort consacré par le groupe THERMAUS dans le projet ÉCHAS.

Bernier [7,8] a effectué des travaux de recherche sur l'exploitation d'un système de stockage de chaleur dans le sol. Une serre expérimentale a été construite avec un tel système à l'Institut de technologie agro-alimentaire de La Pocatière où Bernier a pu effectuer des mesures de l'efficacité énergétique du système (voir Figure 2.1). Le jour, l'air chaud est recueilli à un bout de la serre dans le faîte pour être distribué aux conduits dans le sol via un plénum; ensuite l'air refroidi est redistribué dans la serre à l'autre bout. Le soir, l'air est recueilli au bout de la serre près du sol pour être distribué à l'ensemble de conduits; ensuite l'air réchauffé est rejeté dans la serre à l'autre bout.

Bien que la mesure de l'efficacité dépend de plusieurs facteurs inhérents à la nature de la serre et au type de culture qui y règne, Bernier a pu estimer à 33% l'économie d'énergie attribuable au stockage de chaleur sous la serre et de 0,9 à 5,5 ans le retour sur investissement qu'engendre l'installation et l'exploitation d'un tel système [8].

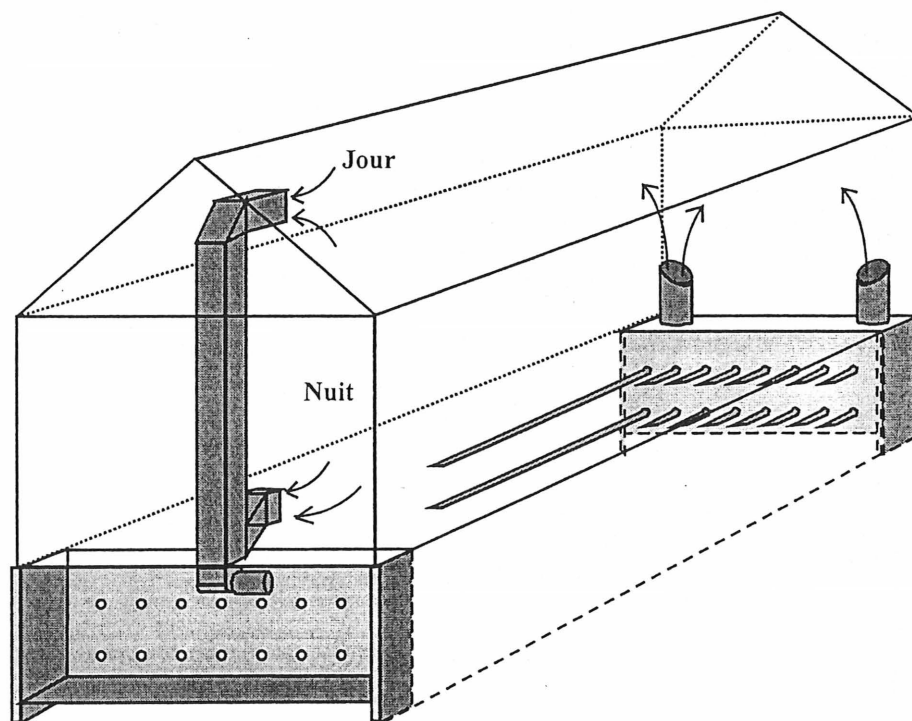


Figure 2.1 : Système ÉCHAS installé à l'ITA de La Pocatière



## 2.2 Modèle des échanges thermiques dans une serre

Lemay [5] a simulé tous les paramètres intervenant dans la dynamique thermique des serres québécoises en fonction de leur lieu géographique. Ce sont ses principales conclusions, à savoir l'influence de chaque élément intervenant dans le bilan énergétique global, qui serviront à établir un modèle de départ représentatif d'une serre type québécoise pour nos simulations. Quant au surplus de chaleur potentiellement « stockable », il en conclut que pour les régions de Montréal et de La Pocatière, on peut espérer être en mesure de stocker l'énergie dès les deux premières semaines de mars jusqu'à la fin septembre. Toutefois, cette période est réduite de 1,5 à 2 mois pour la région de Sept-Îles. Finalement, plus la serre est au sud, plus le système ÉCHAS est intéressant.

## 2.3 Code numérique pour le transfert de chaleur dans le sol

Gauthier et al. [9] ont développé un code numérique (baptisé Biko) simulant la conduction de chaleur dans un milieu tridimensionnel en appliquant les équations de conservation connues. Le code a été appliqué à un sol muni de conduits où circule de l'air. En effectuant des simulations, ils ont pu démontrer l'influence de divers paramètres sur la performance (quantité de chaleur récupérée sur la quantité de chaleur stockée) d'un ÉCHAS. Leur modèle fut validé en comparant les données de Bernier [7] sur les températures d'entrée et de sortie de son système ÉCHAS construit à La Pocatière avec celles générées par Biko.

Premièrement, ils ont pu établir que plus l'air circule rapidement dans les conduits, plus la performance augmente; de plus, une vitesse d'écoulement d'air de 4 m/s est optimale (meilleur compromis Coût vs Performance). En second lieu, il a été démontré que la quantité de chaleur stockée ou récupérée décroît exponentiellement avec la distance centre à centre et la longueur des conduits. Troisièmement, la quantité de chaleur stockée augmente avec la teneur en eau du sol, mais cet effet devient négligeable pour de grandes longueurs de conduits et de faibles vitesses d'écoulement d'air. Quatrièmement, bien que la présence des murs de fondation sur le périmètre de la serre a un effet imperceptible sur la performance d'un ÉCHAS, le fait d'isoler ceux-ci

augmente le rapport de l'énergie récupérée à celle stockée dans le sol jusqu'à environ 70%: ce rapport se prolonge dans les 90% si le dessous du système est isolé. Finalement, plus d'énergie est stockée si on enfouit les conduits plus profondément dans le sol. Par contre, moins d'énergie sera récupérée.

Ces premières études paramétriques serviront de guide aux choix de simulations qui seront faites ultérieurement.

Finalement, 2 études indépendantes l'une de l'autre ont été menées : échanges thermiques dans une serre, et transfert de chaleur dans le sol (ÉCHAS). Il s'agit maintenant de comprendre le comportement thermique du système global serre+ÉCHAS.

### 3. DÉFINITION DU PROBLÈME À ÉTUDIER

Le problème avec les systèmes ÉCHAS en serriculture réside dans le manque de connaissances à leur sujet. En effet, bien que plusieurs systèmes du genre sont en opération dans le monde, leur configuration et leur mode d'opération ne sont pas forcément des plus favorables. Il en résulte que les serriculteurs sont réticents à investir dans un appareillage méconnu. L'industrie de la culture en serre est très conservatrice et de nouvelles technologies, afin d'être adoptées, se doivent d'être bien présentées, avec des modèles simples et des performances connues et quantifiables. Il faut donc effectuer plusieurs simulations sur des systèmes différents (arrangement des conduits, sol maintenu saturé en eau, isolation, fonctionnement continu ou non, etc.) et des serres différentes (lieu géographique, stratégie d'opération). Pour chaque scénario, il faudra analyser la performance énergétique, les économies de chauffage et les économies d'énergie engendrées. Tous ces résultats serviront à formuler des recommandations claires et simplifiées quant à l'utilisation des systèmes ÉCHAS au Québec.

#### **Objectifs :**

Face à cette dernière étape du projet ÉCHAS, soit le projet de maîtrise « Analyse du comportement énergétique d'une serre munie d'un système de stockage de chaleur souterrain », trois objectifs ont été définis :

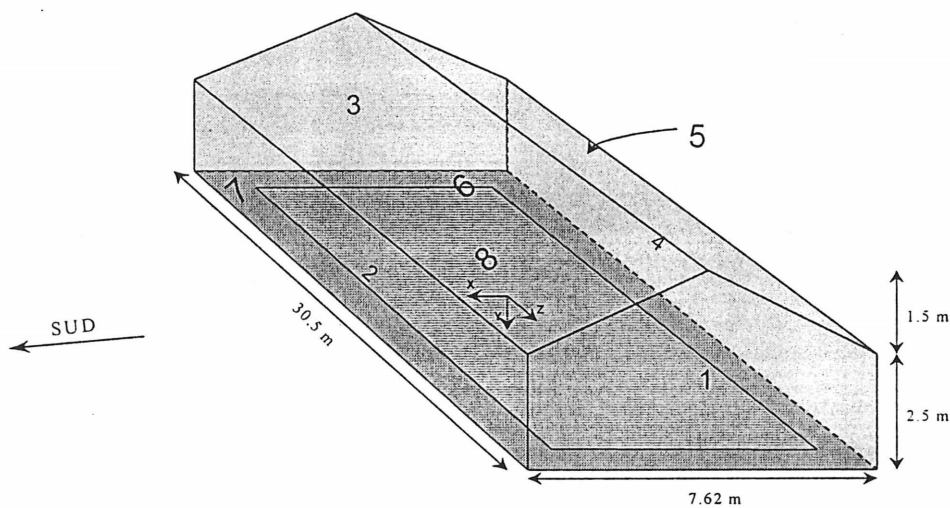
- Couplage du modèle de stockage de chaleur sous la serre (Biko) avec un modèle de serre (TRNSYS);
- Analyse paramétrique et économique en vue de comprendre le comportement du système de stockage pour différentes serres;
- Établissement de critères de conception et d'exploitation du système de stockage;

#### 4. MODÉLISATION DE LA SERRE ET DU SYSTÈME DE STOCKAGE

Afin de modéliser numériquement la serre, il faut déterminer quelles caractéristiques de celle-ci seront retenues. Les travaux de Lemay [5] ont permis de bien cerner les caractéristiques de la serre typique québécoise, ainsi que celles qui peuvent être négligées étant donné leur faible influence sur le comportement thermique de la serre. Parallèlement, les travaux de Gauthier et al. [9] ont permis de faire de même avec le sol sous la serre. Suite à ces résultats, un modèle complet a pu être conçu.

##### 4.1 Caractéristiques de la serre

La figure suivante représente les dimensions de la serre choisie, ainsi que l'identification des surfaces d'échange thermique par les chiffres 1 à 8.



Dimensions : Rez-de-chaussé :	30.5m X 7.62m X 2.5m
Entre-toît :	30.5m X 7.62m X 1.5m
Volume total :	$581 \text{ m}^3 + 174.3 \text{ m}^3 = 755.3 \text{ m}^3$

Figure 4.1 : Schéma de la serre avec dimensions

De plus, les caractéristiques générales suivantes ont été retenues :

- Murs est (1), ouest (3) et nord (4) isolés
- Murs sud (2) et le toit (5,6) recouverts de polyéthylène double
- (7) et (8) représentent respectivement la surface du sol et le mur de plantes (les plantes ont une taille moyenne et constante pendant l'année)
- Pas de salle de contrôle
- Personne dans la serre
- Pas de production artificielle de  $\text{CO}_2$
- Pas d'éclairage artificiel
- Pas de condensation
- Pas d'évaporation au sol
- Pas de toile thermique

#### 4.2 Modèle de la serre

La serre a été modélisée comme étant un seul nœud, c'est-à-dire une seule masse d'air où s'établit un bilan thermique. Ce bilan comporte des taux de transfert de chaleur d'origines diverses. (Voir Figure 4.2)

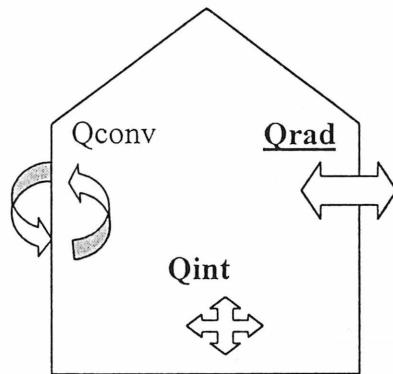


Figure 4.2 : Modélisation de la serre comme un seul nœud

Voici l'équation du bilan thermique de la serre avec une explication de chaque terme qui s'y trouve :

$$Q = Q_{\text{conv}} + Q_{\text{rad}} + Q_{\text{int}} \quad (1)$$

Q : bilan du taux de transfert de chaleur (t.t.c.) global que subit le système « serre ».

Q<sub>conv</sub> : t.t.c. du à la convection de l'air à l'intérieur de la serre sur les murs, le sol, les plantes et le toit.

Q<sub>rad</sub> : t.t.c. du à la radiation et au rayonnement lumineux, ceci inclut le rayonnement solaire ainsi que les échanges radiatifs entre les surfaces (murs, toit, sol et plantes)

Q<sub>int</sub> : somme des gains ou pertes internes de chaleur

Ces variations de chaleur dites internes se décomposent en 7 sources spécifiques et quantifiables :

$$Q_{\text{int}} = Q_{\text{eau}} + Q_{\text{evap}} + Q_{\text{ch}} + Q_{\text{vent}} + Q_{\text{cond}} + Q_{\text{motv}} + Q_{\text{infl}} \quad (2)$$

Q<sub>eau</sub> : transfert de chaleur du au réchauffement dans la serre de l'eau d'arrosage des cultures qui provient d'un puits à 4°C.  $Q_{\text{eau}} = V_{\text{eau}} C_{p_{\text{eau}}} (T_z - 4^\circ\text{C})$ , où  $V_{\text{eau}}$  représente le volume d'eau à préchauffer,  $C_{p_{\text{eau}}}$  est la capacité thermique de l'eau (4,2 kJ/kg°C) et  $T_z$  est la température intérieure de la serre.

Q<sub>evap</sub> : t.t.c. du à l'évapotranspiration constante des plantes.  $Q_{\text{evap}} = A_p h_p ((T_z - 0,75) - T_p)$ , où  $A_p$ ,  $h_p$  et  $T_p$  sont l'aire, le coefficient de convection (25,4 kJ/h m<sup>2</sup> K [5]) et la température apparents du mur de plants;  $(T_z - 0,75)$  signifie que les plants se maintiennent, par phénomène d'évapotranspiration, à la température de la serre moins 0,75°C.

Q<sub>ch</sub> : t.t.c. fournit par le système de chauffage; capacité de 180.56kW.

Q<sub>vent</sub> : t.t.c. engendré par les changements d'air dus à la ventilation des surplus de chaleur (1 changement d'air/minute) et d'humidité (1/4 de changement d'air/minute).

$Q_{vent} = m_{vent} C_{p_a} (T_a - T_z)$ , où  $m_{vent}$  est le débit d'air évacué,  $C_{p_a}$  et  $T_a$  sont la capacité thermique et la température de l'air extérieur

$Q_{cond}$  : t.t.c. du à l'air qui circule dans les conduits du système ÉCHAS.  $Q_{cond} = A_c h_c (T_{sol} - T_z)$ , où  $A_c$  est l'aire de la surface interne de tous les conduits enfouis,  $h_c$  est le coefficient de convection entre l'air et les conduits ( $23 \text{ W/m}^2\text{K}$  [15]) et  $T_{sol}$  est la température du sol.

$Q_{motv}$  : t.t.c. engendré par le fonctionnement des moteurs de l'ÉCHAS (3kW).

$Q_{infl}$  : t.t.c. du aux infiltrations d'air dans la serre.  $Q_{infl} = m_{infl} C_{p_a} (T_a - T_z)$ , où  $m_{infl}$  est le débit d'air qui s'infiltré dans la serre [5].

De plus, la relation  $Q = Cap \Delta T$  (3) nous permet de déterminer la variation de température à l'intérieur de la serre en sachant quelle quantité de chaleur y règne (par le bilan). Pour cela, il faut déterminer la capacité calorifique totale (Cap) du système. Lemay [5] l'a posée comme suit :

$$Cap = Cap_{air} + Cap_{équip} + Cap_{plantes} \quad (4)$$

$$Cap_{air} = \rho C_p V_{total} = 882 \text{ kJ/}^\circ\text{C} \quad (5)$$

$$Cap_{équi} = (4 \text{ kJ/}^\circ\text{C}) / \text{m}^2 \text{ de serre} \times 232.4 \text{ m}^2 = 930 \text{ kJ/}^\circ\text{C}$$

$$Cap_{plantes} = (10 \text{ kJ/}^\circ\text{C}) / \text{m}^2 \text{ de serre} \times 232.4 \text{ m}^2 = 2300 \text{ kJ/}^\circ\text{C}$$

$$Cap \approx 4100 \text{ kJ / }^\circ\text{C}$$

Cette section résume le modèle thermique qui a été employé pour simuler la serre. Pour plus de précisions, un document décrivant ce modèle en détail est présenté à l'annexe A.

### 4.3 Modèle du système de stockage dans le sol

Le système de stockage de chaleur ÉCHAS est constitué de conduits de PVC dans lesquels circule l'air recueilli dans la serre. Ces conduits sont enfouis dans le sol sous la serre, qui est un milieu poreux et humide. De plus, le sol peut être confiné par une fondation de béton et/ou de l'isolant de polystyrène. Le modèle de transfert de chaleur de ce système est basé sur les hypothèses suivantes :

- (1) La conduction de chaleur dans le sol se fait de façon transitoire dans un milieu tridimensionnel cartésien.
- (2) Les propriétés thermo-physiques ainsi que la concentration hydrique du sol sont constantes et indépendantes de la température, mais elles peuvent être non-homogènes.
- (3) Le transfert de chaleur causé par le gradient d'humidité est faible vis à vis celui engendré par le gradient thermique.
- (4) Le transfert de chaleur dans les conduits est dominé par la convection dans la direction axiale. Il est toutefois couplé au champs de température dans le sol via les conditions frontières à la surface des conduits.
- (5) La condensation et l'évaporation d'eau dans les conduits sont prises en considération.
- (6) Les conduits, de section circulaire, sont modélisés comme étant de section carrée d'aire équivalente.

L'hypothèse 3. est justifiée par le fait que les processus de transfert de chaleur (charge et décharge du sol) ont lieu sur des périodes de 24 heures et impliquent des différences de température de moins de 10 K. Une analyse dimensionnelle conduite par Gauthier [10] démontre que pour des cas extrêmes, le gradient d'humidité compte pour moins de 0,1% du transfert de chaleur total dans le sol. Puri [11] en est aussi venu à la conclusion qu'une variation du gradient d'humidité dans le sol a peu d'effet sur le transfert de chaleur parce que la diffusivité thermique du sol varie peu avec son contenu en eau. La conductivité thermique augmente avec le contenu en eau, mais la capacité calorifique volumétrique augmente elle aussi, dans une proportion similaire.

L'hypothèse 6. a été adoptée afin qu'un repère cartésien simple puisse être utilisé. Cette hypothèse simplifie considérablement le modèle numérique, sans toutefois sacrifier la précision des prédictions numériques. De plus, afin de calculer correctement le quantité de chaleur échangée entre le conduit et le sol, le coefficient de convection d'un conduit de section carrée doit provenir du coefficient pour un conduit de section circulaire multiplié par un facteur de  $\sqrt{\pi}/2$ . Ce facteur représente le rapport entre le périmètre du conduit circulaire et celui du conduit carré d'aire égale [4].



Sujette aux hypothèses précédentes, l'équation de conservation d'énergie pour le sol, le béton et l'isolant s'écrit ainsi :

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S \quad (6)$$

Pour ce qui est des conduits,

$$\frac{dH}{dz} = \frac{q'}{VA_s} - \frac{d\omega}{dz} \rho h_L \quad (7)$$

Le terme de droite de l'équation (7) tient compte de la variation de l'humidité de l'air quand il circule dans le conduit (condensation ou évaporation). La capacité calorifique volumétrique  $C$  et la conductivité thermique  $k$  dans l'équation (6) sont fonction de l'humidité dans le sol comme suit :

$$C = C_{cte} + C_\theta \theta \quad (8)$$

$$k = k_{cte} + k_\theta \theta \quad (9)$$

Les paramètres  $C_{cte}$ ,  $C_\theta$ ,  $k_{cte}$ ,  $k_\theta$  sont déterminés selon la relation de DeVries [12] pour le sol humide. Pour les autres composantes, tel le béton et l'isolant,  $C_\theta$  et  $k_\theta$  valent zéro.

Les conditions frontières utilisées pour résoudre les équations de conservation de tout le domaine de calcul (ensemble fondation-isolant-sol-conduits) sont les suivantes :

À l'entrée des conduits,

$$H(0) = H_m \quad (10)$$

Où  $H_m$  est déterminé expérimentalement.

Les surfaces extérieures latérales du domaine de calcul sont considérés adiabatiques. i.e.

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (11)$$

Où  $n$  est un vecteur normal à la surface.

Une température constante et uniforme est imposée sur le dernier plan horizontal sous le domaine de calcul. Pour ce qui est du premier plan horizontal sur le domaine de calcul (surface du sol), nous posons :

$$k_{sol} \frac{\partial T_{sol}}{\partial y} = h(T_{sol} - T_{airr}) \quad (12)$$

Où  $T_{surr}$  est la température des entourages et  $h$  est le coefficient de convection estimé à l'aide d'une corrélation empirique.

Finalement, les équations de conservation (6) et (7) sont couplées via le flux de chaleur  $q'$  donné par la condition frontière à la surface du conduit, i.e.

$$q' = Ph_c(T_{so} - T_{air}) \quad (13)$$

Les équations discrétisées sont obtenues en intégrant l'équation (6) sur chaque volume de contrôle dans l'espace  $x$ ,  $y$ ,  $z$  et l'équation (7) dans la direction  $z$  pour chaque conduit (voir figures 4.3 et 4.4). Le schème de différences finies résultant a la forme :

$$a_p T_p = a_w T_w + a_e T_e + a_s T_s + a_n T_n + a_b T_b + a_t T_t + b_p \quad (14)$$

$$H_T = H_B + \frac{q_p}{VA_s} + (\omega_B - \omega_T) \rho h_L \quad (15)$$

Où :

$$\begin{aligned}
a_W &= 2\delta y_p \delta z_p \left[ \frac{\delta x_W}{k_W} + \frac{\delta x_p}{k_p} \right]^{-1} & a_E &= 2\delta y_p \delta z_p \left[ \frac{\delta x_E}{k_E} + \frac{\delta x_p}{k_p} \right]^{-1} \\
a_S &= 2\delta x_p \delta z_p \left[ \frac{\delta y_S}{k_S} + \frac{\delta y_p}{k_p} \right]^{-1} & a_N &= 2\delta x_p \delta z_p \left[ \frac{\delta y_N}{k_N} + \frac{\delta y_p}{k_p} \right]^{-1} \\
a_B &= 2\delta x_p \delta y_p \left[ \frac{\delta z_B}{k_B} + \frac{\delta z_p}{k_p} \right]^{-1} & a_T &= 2\delta x_p \delta y_p \left[ \frac{\delta z_T}{k_T} + \frac{\delta z_p}{k_p} \right]^{-1}
\end{aligned} \tag{16}$$

$$a_p = C_p \frac{\delta V_p}{\delta t} + a_W + a_E + a_S + a_N + a_B + a_T - St_p \delta V_p \tag{17}$$

$$b_p = \delta V_p \left( Sc_p + \frac{C_p}{\delta t} T_p^0 \right) \tag{18}$$

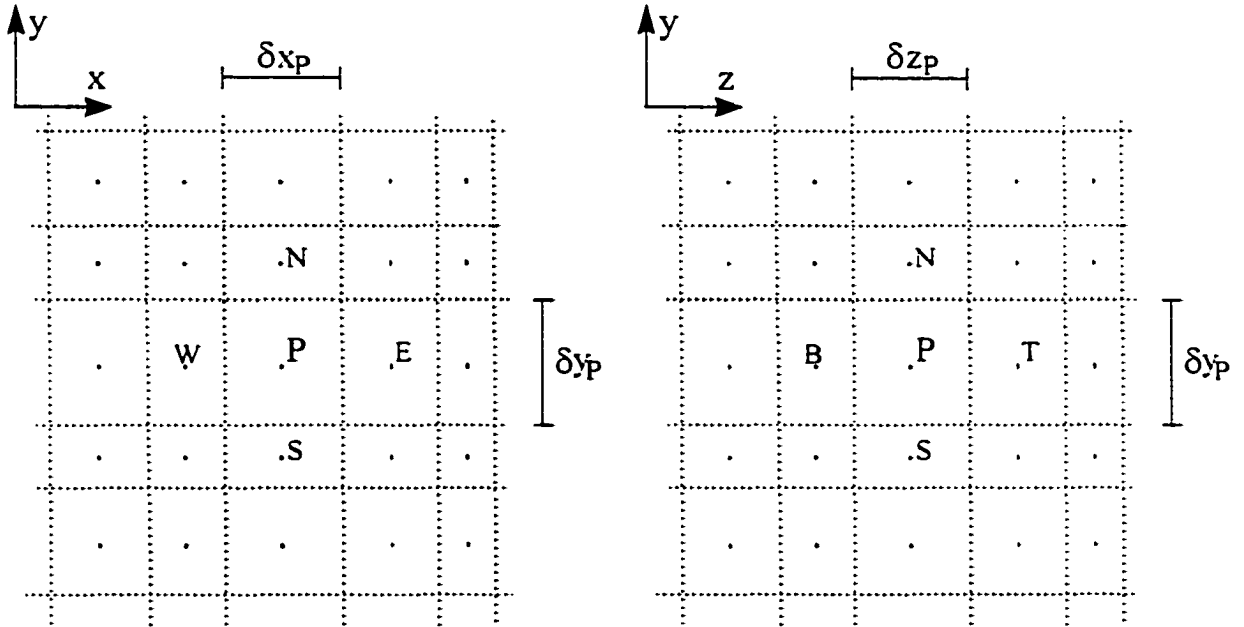


Figure 4.3 : Représentation des plans X-Y et Z-Y du volume de contrôle discrétisé dans le sol

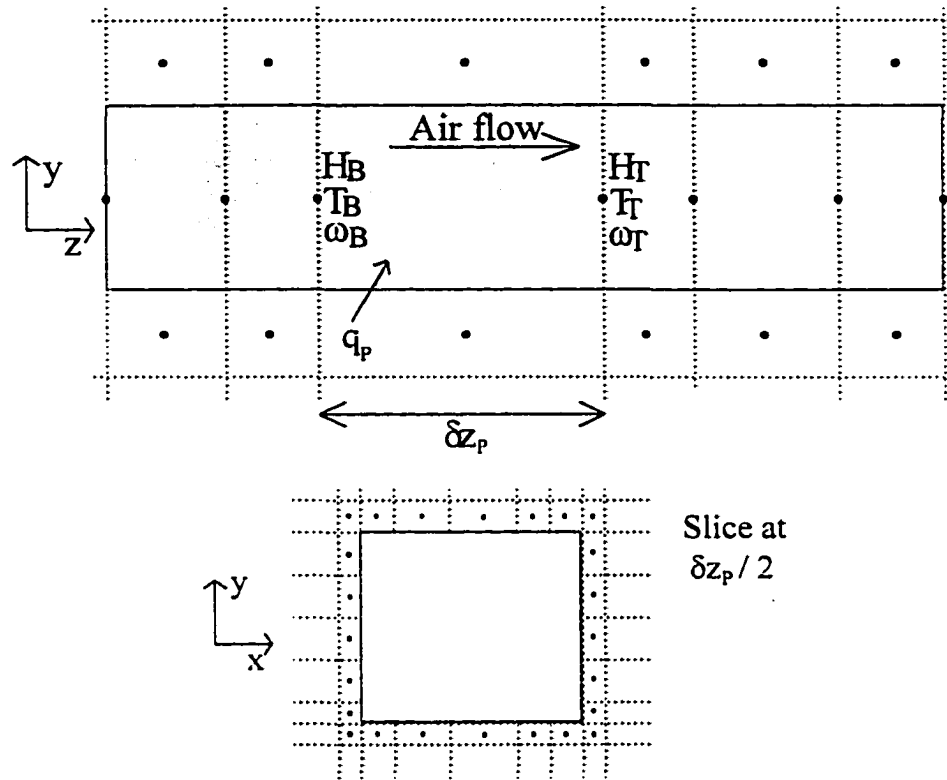


Figure 4.4 : Discrétisation du volume de contrôle du conduit dans le sol

Les équations (14) et (15) sont résolues itérativement à chaque pas de temps jusqu'à convergence. Le critère de convergence est atteint lorsque aucun changement de température local (parmi tout le domaine) n'excède une valeur prédéterminée de 0,001 K entre deux itérations. Les taux de condensation et d'évaporation dans les conduits sont aussi calculés dans le processus itératif. De plus, afin de vérifier la solution numérique obtenue, ces calculs tiennent compte du bilan total d'énergie; en tout temps, la variation d'énergie interne du système doit être égale à la somme des énergies fournies ou reçues sur toutes les frontières du système, incluant la surface des conduits enfouis.

## 4.4 VALIDATION DES MODÈLES

### 4.4.1 Modèle de la serre, sur TRNSYS

Lemay [5] a consacré ses recherches à établir un modèle numérique juste représentant une serre typique. Son modèle a été mis en œuvre sur le logiciel commercial TRNSYS en tenant compte d'une panoplie de facteurs pouvant influencer le comportement thermique d'une serre, plusieurs n'ayant jamais été utilisés pour modéliser une serre auparavant.

Premièrement, le modèle a été validé en régime permanent. Des conditions météorologiques fixes pour l'intérieur et l'extérieur de la serre ont été imposées. En gros, il fallait vérifier si la quantité de chaleur sensible requise pour maintenir la zone étudiée à la température donnée était semblable pour le modèle numérique et pour une équation analytique. Plus spécifiquement, il fallait vérifier si l'influence des gains solaires et internes était bien quantifiée dans le modèle numérique.

Par exemple, l'apport d'énergie dû à un éclairage artificiel fut vérifié. Tout d'abord, on impose certains paramètres fixes au modèle sur TRNSYS: température, humidité, vent, pertes par infiltration, aucune évaporation ou condensation et présence d'éclairage artificiel. Ensuite, on résout l'équation analytique suivante décrivant l'apport en chaleur d'un éclairage artificiel ( $Q_{\text{écl}}$ ), en tenant compte de l'absorption de la lumière par les murs opaques:

$$Q_{\text{écl}} = A_{\text{opaque}}/A_{\text{total}} * Q_{\text{ir}} + 130 N_l \quad (19)$$

où  $A_{\text{opaque}}$  = aire des surfaces opaques

$A_{\text{total}}$  = aire totale des surfaces

$Q_{\text{ir}}$  = énergie radiative des lampes au plafond

$130 N_l$  = chaleur convective perdue par le ballaste des lampes:

$130\text{W} * \text{nombre de lampes } (N_l)$

Finalement on compare l'apport d'énergie dans la serre causé par l'éclairage seulement (dans le modèle sur TRNSYS) au Qécl engendré par l'équation analytique. Les résultats montrent que l'écart entre les deux valeurs est assez grande au début de la simulation (de l'ordre de 40%), puis au bout d'une centaine d'heures de simulation, l'écart n'est plus que de l'ordre du 1%, ce qui est très concluant. Le grand écart lors des cent premières heures est dû au temps requis avant que l'effet des conditions initiales imposées s'estompe. Ces résultats, parmi d'autres en régime permanent, sont concluants et on accepte le modèle en régime permanent.

Deuxièmement, le modèle a été validé en régime transitoire. Le modèle est utilisé dans son ensemble, sans aucune simplification. Pour valider un tel code, on se base sur des modèles simplifiés reconnus et des résultats expérimentaux provenant d'une serre expérimentale de La Pocatière. Le terme « simplifiés » signifie ici que la validation se fait généralement sur une base mensuelle afin de ne pas être obligé de tenir compte des affres du climat. Dans le cas des résultats expérimentaux, les paramètres qui ont mené à ces valeurs ne sont pas habituellement connus sur une base horaire, ou bien incomplets. Dans ce cas, seules quelques composantes du modèle sont validées sur une base horaire, alors que l'ensemble du système est évalué sur une base mensuelle. Dans cet optique, Lemay a validé 3 éléments thermiques très importants pour une serre : l'évapotranspiration des plantes, la condensation et la stratification thermique entre les 2 zones.

Après avoir validé chacune des composantes stratégiques du modèle, il a fallu vérifier le comportement de l'ensemble du système formé de ces sous-ensembles en question. Pour ce faire, les résultats obtenus sont comparés à ceux générés par la méthode du C.R.E.A.Q. [13]. Cette comparaison permet de constater la grande ressemblance des deux modèles dans la prédiction de la quantité de chaleur requise pour maintenir la serre aux conditions voulues. La Figure 4.5 illustre bien cette comparaison.

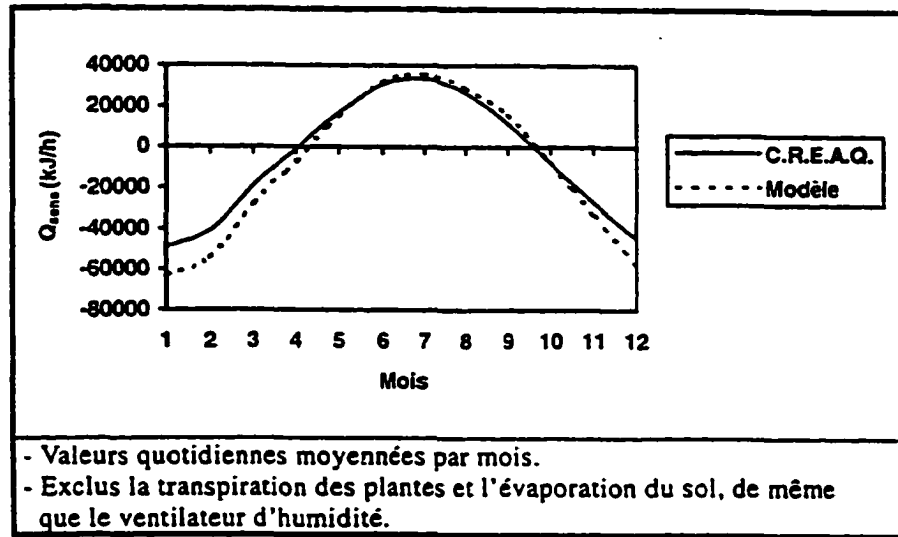


Figure 4.5: Comparaison du bilan de chauffage mensuel d'une serre selon deux modèles

L'écart plus prononcé entre les deux bilans lors des mois d'hiver s'explique par le fait que le présent modèle tient compte de l'angle d'incidence entre le rayonnement solaire et le fenêtrage et de l'effet du vent sur les pertes de chaleur de la serre. Le modèle du C.R.E.A.Q. ne tient pas compte de ces phénomènes non-négligeables, ce qui a pour effet sous-estimer la demande en chauffage de la serre lors des mois d'hiver.

« En résumé, le modèle a montré qu'il donnait de bons résultats, tant en régime permanent qu'en régime transitoire. » [5]

#### 4.4.2 Modèle du sol et de l'ÉCHAS sur Biko

Le modèle développé par Gauthier a été premièrement validé en comparant ses prédictions numériques avec les solutions analytiques de transfert de chaleur par conduction sujettes aux conditions frontières de Dirichlet, Neumann et mixtes en 1, 2 et 3 dimensions. Les prédictions transitoires ont aussi été comparés, mais cette fois avec le logiciel commercial FLOW3D [14]. Le tout étant concluant, le code numérique du

système sol-conduits fut maintenant assujéti à des données expérimentales. Encore une fois, la serre expérimentale de La Pocatière, comprenant un système ÉCHAS, a servi de référence. Du 22 au 25 avril 1986, plusieurs données furent recueillis : température intérieure et extérieure, température et humidité à l'entrée et à la sortie des conduits de l'ÉCHAS, températures du sol. Ce système (sol-conduits) fut modélisé dans son ensemble.

La Figure 5.2 de la section suivante représente une vue en coupe d'un système semblable. Le modèle numérique décrivant le système expérimental de La Pocatière comporte toutefois les caractéristiques spécifiques suivantes: aucune isolation sous le système, 12 paires de conduits de 10,5 m de longueur, première rangée de conduits enfouis à 0,45 m du plancher et seconde rangée à 0,75 m, distance entre les conduits de 0,402 m horizontalement et 0,448 m verticalement, ventilateur de 750 Watts fournissant un débit d'air de  $0,91 \text{ m}^3/\text{s}$  d'air à 3,8 m/s dans les conduits. Trois maillages différents ont été considérés: 125X50X10, 179X77X10 et 275X111X10. De plus, le coefficient de convection à l'intérieur des conduits a été fixé à  $23 \text{ W/m}^2\text{K}$  de par les relations de Sibley et Raghavan [15].

Par la suite, les données recueillies et celles prédites par le modèle ont été comparées. Malgré quelques hypothèse simplificatrices (température constante et uniforme sous le système, propriétés physiques constantes, mais non-homogènes), les résultats sont très près de la réalité. En effet, dans le pire des cas, nous observons une différence d'au plus 5,2% pour la variation de température de l'air dans les conduits entre le modèle et les données expérimentales. La figure 4.5 illustre bien le peu de différence entre les écarts de température calculées et mesurées. Notons qu'un maillage plus grossier du système entraîne un peu plus d'imprécision, mais si peu que ça ne vaut pas l'augmentation en temps CPU et en exigence mémoire.



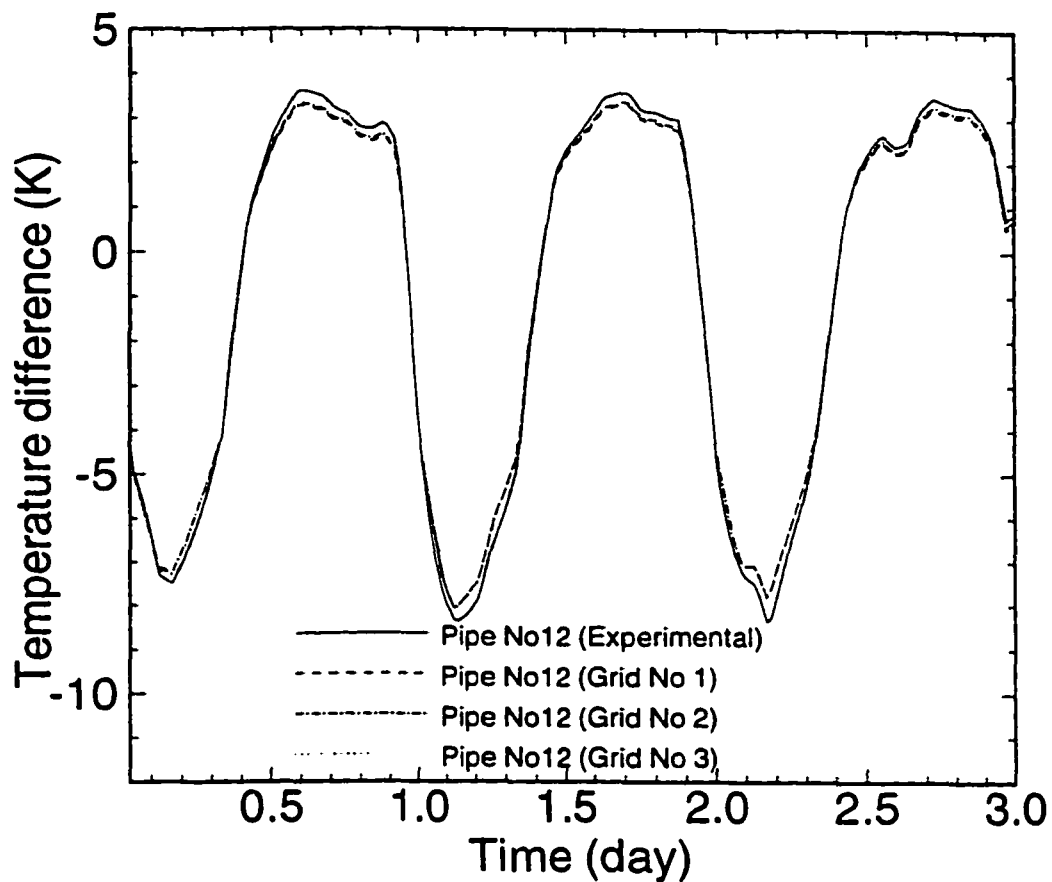


Figure 4.6 : Différence de température prédite et mesurée entre l'entrée et la sortie d'un conduit

Les deux modèles numériques (serre, sol-conduits) sont maintenant validés. À la prochaine section, ces deux modèles seront couplés ensemble afin de simuler des systèmes complets Serre-Sol-ÉCHAS.

#### 4.5 Couplage du modèle de la serre et du système de stockage dans le sol

Au niveau informatique, le couplage des deux modèles présente plusieurs contraintes qui ont été éliminées par les travaux de Gauthier. Au niveau de la dynamique thermique de ce système complet, les lois régissant le transfert de chaleur sont respectées. En effet, à tout moment lors d'une simulation, le code vérifie si les transferts thermiques entre le sol et la serre ne font pas varier le bilan thermique global du système. Autrement dit, il y a vérification systématique qu'aucune énergie n'est perdue ou créée et que les échanges se font selon les équations connues et appliquées. l'équation suivante représente la vérification faite par le système. À tous les pas de temps, il faut que la variation de quantité de chaleur dans le sol soit égale à la chaleur échangée dans les conduits plus celle échangée au niveau de l'interface sol-air:

$$\Delta(Cp_{sol} \rho_{sol} V_{sol} T_{sol}) = m_c Cp_c \Delta T_c t + h_{sol} A_{sol} \Delta T_{sol-air} t \quad (20)$$

où  $Cp_{sol}$ ,  $\rho_{sol}$ ,  $V_{sol}$  et  $T_{sol}$  sont les caractéristiques physiques moyennes de chaque type de sol contenu dans le modèle Biko

$m_c$  est le débit d'air dans les conduits de l'ÉCHAS

$\Delta T_c$  est la variation de température moyenne de l'air entre l'entrée et la sortie des conduits

$t$  est le pas de temps

$h_{sol}$  est le coefficient de convection entre le plancher du sol et l'air (5 W/m<sup>2</sup>K à l'intérieur et 10 W/m<sup>2</sup>K à l'extérieur de la serre)

$A_{sol}$  est l'aire des surfaces d'échanges convectifs sol-air

$\Delta T_{sol-air}$  est la différence de température moyenne entre l'air (de la serre ou extérieur) et la surface du sol

Ce modèle global est logiquement validé et prêt à être exploité afin de déterminer précisément l'efficacité d'un ÉCHAS pour nos serres québécoises, et ce, pour différents scénarios.

Le modèle de la serre a été mis en œuvre numériquement à l'aide du logiciel TRNSYS [16]. TRNSYS est un logiciel commercial de simulation de systèmes thermiques transitoires. Chaque système est décomposé en une série d'unités de différent type, elles peuvent être: une pièce, une surface (mur), un thermostat, des données météorologiques, un capteur solaire, un ventilateur d'évacuation, etc. Toutes ces unités doivent être décrites par un ensemble de données physiques qui les caractérise, afin de produire une fonction de transfert qui transformera diverses conditions d'entrée en des sorties (réponses) fidèles à la réalité. TRNSYS utilise les équations de conservation connues pour ses calculs. Bien que le modèle représente en détail l'ensemble des facteurs intervenant dans le bilan thermique d'une serre, le sol (plancher de la serre) fut représenté comme un simple mur, puisque TRNSYS ne peut le traiter autrement. Cela affecte peu le bilan thermique final, mais si l'on veut tenir compte des échanges thermiques avec un sol où serait enfoui des conduits circulant l'air de la serre, le modèle numérique du système sol-ÉCHAS doit être greffé à TRNSYS.

Le modèle du sol décrit dans la section précédente a été mis en œuvre numériquement par un code Fortran baptisé Biko. Afin que ce code entre en relation avec TRNSYS, il a dû être adapté afin d'en faire une unité reconnue par TRNSYS. La version 2.5t de Biko a été construite de façon à former un nouveau type de TRNSYS, le type 75. Le programme TRNSYS utilise un processus itératif pour résoudre les systèmes thermiques. À chaque pas de temps TRNSYS appelle itérativement chacune des unités (de différents types) jusqu'à ce que les sorties de toutes les unités aient convergées. Donc le type 75 (Biko) peut être appelé plus d'une fois à l'intérieur d'un même pas de temps. À chaque fois qu'il est appelé, le type 75 effectue lui aussi un processus itératif sur le champ de température dans tout le domaine. De plus, à chaque itération sur le champ de température, un autre processus itératif est utilisé pour la résolution des profils de température et d'humidité dans les conduits.

Lorsque TRNSYS appelle le type Biko, il lui fournit la température à l'intérieur de la serre. Biko tient compte de cette température, du rayonnement lumineux sur le sol et du profil de température du sol pour retourner à TRNSYS un taux de transfert de chaleur entre le sol et l'intérieur de la serre. De plus, Biko tient compte des conditions climatiques à l'extérieur de la serre qui influencent la température du sol autour de la serre. Enfin, lorsque l'ÉCHAS est en

marche, Biko traite le transfert de chaleur associé au débit d'air dans les conduits. L'air entre dans les conduits de l'ÉCHAS aux conditions de la serre (calculée par TRNSYS) et retourne dans la serre avec la température et l'humidité calculée par Biko.

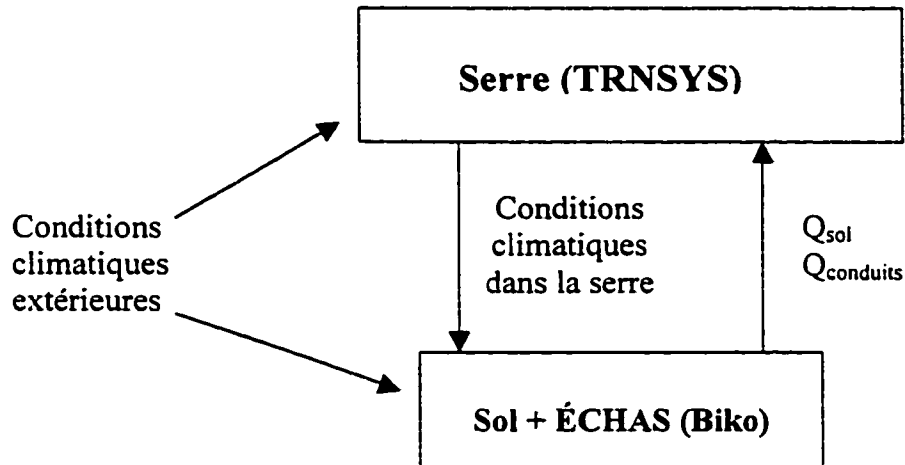


Figure 4.7 : Relation entre le modèle de la serre et le modèle du sol

## 4.6 Exploitation modèle global serre-sol

### 4.6.1 Le chauffage et la ventilation

Afin que les systèmes de chauffage, ventilation et ÉCHAS fonctionnent correctement, selon des plages de confort requises par les cultures, des conditions d'exploitation ont été imposées au modèle informatique.

De prime abord, il faut connaître quelles sont les températures de confort,  $T_{jour}$  et  $T_{nuit}$ . Ce sont les températures cibles désirées dans la serre le jour (8h00 à 19h59) et la nuit (20h00 à 7h59); ces dernières varient selon la stratégie prônée par le serriculteur. Quatre paires de températures de confort sont retenues pour les simulations:

- a)  $T_{\text{jour}} = 24^{\circ}\text{C}$  et  $T_{\text{nuit}} = 16^{\circ}\text{C}$
- b)  $T_{\text{jour}} = 22^{\circ}\text{C}$  et  $T_{\text{nuit}} = 18^{\circ}\text{C}$
- c)  $T_{\text{jour}} = 20^{\circ}\text{C}$  et  $T_{\text{nuit}} = 18^{\circ}\text{C}$
- d)  $T_{\text{jour}} = 24^{\circ}\text{C}$  et  $T_{\text{nuit}} = 14^{\circ}\text{C}$

Le jour, le chauffage démarre lorsque la température dans la serre ( $T_z$ ) atteint  $T_{\text{jour}}-1^{\circ}\text{C}$  et s'arrête lorsque celle-ci atteint  $T_{\text{jour}}+1^{\circ}\text{C}$ . La nuit, le chauffage démarre lorsqu'on a  $T_{\text{nuit}}-1^{\circ}\text{C}$  et s'arrête à  $T_{\text{nuit}}+1^{\circ}\text{C}$ .

De plus, il faut déterminer quelles sont les températures et humidités relatives maximales admissibles dans la serre. Lorsque les conditions dans la serre atteignent ces valeurs maximales, les ventilateurs d'évacuation de surplus de chaleur ou d'humidité démarrent. Les ventilateurs d'humidité démarrent lorsque l'humidité relative dans la serre atteint 80%, puis ils s'arrêtent à 70%. Les ventilateurs de surchauffe démarrent lorsque  $T_z=28^{\circ}\text{C}$ , puis s'arrêtent à  $T_z=26^{\circ}\text{C}$ .

#### 4.6.2 Le système ÉCHAS

Tel que mentionné précédemment, il y a un gradient thermique dans la serre entre le sol et le faite, ce qui influence la température de l'air qui entre dans les conduits. Le jour, l'air à l'entrée des conduits provient du faite de la serre et sa température sera donc égale à  $T_z+2.0^{\circ}\text{C}$ . La nuit l'air à l'entrée des conduits est recueilli au niveau du sol et sa température sera donc égale à  $T_z - 2.0^{\circ}\text{C}$ .

Le système de stockage fonctionne en mode recirculation seulement. Il est indépendant des systèmes de ventilation du surplus d'humidité et de surchauffe. Deux paramètres sont utilisés pour contrôler le système de stockage: la température dans la serre ( $T_z$ ) et la différence de température entre la serre et le sol entre les conduits ( $dT_{z\text{sol}} = T_z - T_{\text{sol}}$ ). La température  $T_{\text{sol}}$  correspond à la température moyenne sur une ligne imaginaire le long des conduits, située au centre de quatre conduits. Le jour, le système de stockage ne doit jamais fonctionner en même temps que le système de chauffage. Lorsque le système fonctionne, la vitesse d'écoulement de l'air dans les conduits,  $V_c=4.0$  m/s et dans le cas contraire,  $V_c=0.0$  m/s.

**Le jour**

Démarre si :  $T_z > T_{\text{jour}} + 2.0\text{ °C}$  et  $dT_{\text{zsol}} > 2.0\text{ °C}$

S'arrête si :  $T_z < T_{\text{jour}} - 1.0\text{ °C}$  ou  $dT_{\text{zsol}} < 0.0$

**La nuit**

Démarre si :  $T_z < T_{\text{nuit}}$  et  $dT_{\text{zsol}} < -2.0\text{ °C}$

S'arrête si :  $T_z > T_{\text{nuit}} + 1.0\text{ °C}$  ou  $dT_{\text{zsol}} > 0$

Finalement, il y a possibilité d'intégrer le système ÉCHAS à la ventilation. Si tel est le cas, rien ne changera pendant la nuit. Toutefois, pendant le jour, les surplus de chaleur et d'humidité passent par les conduits de l'ÉCHAS avant d'être évacués à l'extérieur. Une telle stratégie est avantageuse pour le système ÉCHAS, car elle permet de stocker davantage de chaleur. Par contre, elle sera peu utilisée par les serriculteurs, puisque l'évacuation des surplus de chaleur et d'humidité doit se faire très rapidement, afin de conserver les conditions optimales de culture.

## 5. LES SYSTÈMES SIMULÉS

Maintenant que le modèle numérique d'une serre typique couplé à un système de stockage de chaleur dans le sol (ÉCHAS) est mis en œuvre et validé, il faut déterminer quels sont les scénarios à étudier. Une analyse paramétrique est effectuée en vue de déterminer la performance de la serre typique couplée au système de stockage souterrain. Les principaux paramètres examinés sont les climats, les températures d'exploitation de la serre (décrit à la section 4.6.1), l'intégration du système de stockage au système de ventilation (section 4.6.2), la distribution et la longueur des conduits souterrains, la présence de fondations et/ou d'isolation sur le pourtour du système et les caractéristiques du sol.

### 5.1 Besoins en chauffage de serres typiques

Afin de quantifier la performance des systèmes ÉCHAS, il faut déterminer quels sont les besoins en chauffage des serres, sans système de stockage de chaleur, que nous voulons étudier.

Premièrement, une période d'exploitation de la serre est fixée : du 1<sup>er</sup> février au 31 octobre de chaque année. La serre est en production continue pendant ces neuf mois et les températures de confort doivent être atteintes en tout temps. Pour les besoins de l'analyse, nous considérons qu'au 1<sup>er</sup> février, l'intérieur de la serre et le sol sont déjà à des températures convenables.

Deuxièmement, il faut déterminer quels seront les données météorologiques horaires utilisées. Pour ce faire, il faut d'abord choisir des régions géographiques représentatives [5] : Sept-Îles (Québec), Montréal (Québec), ainsi que La Pocatière (Québec). Ces villes couvrent deux zones climatiques distinctes, ainsi que la zone où est construite la serre munie d'un ÉCHAS (La Pocatière). Environnement Canada nous fournit des données climatiques mensuelles moyennes pour ces régions. Le TABLEAU 5.1 montre ces données.

TABLEAU 5.1 DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES MENSUELLES MOYENNES DES 4 RÉGIONS ÉTUDIÉES

Région	Donnée météo.	Mois											
		Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Sept-Îles	Température (°C) <sup>i</sup>	-13.9	-12.7	-6.7	-0.3	5.7	11.6	15.1	14.2	9.6	4.0	-2.2	-10.4
	Rayon. (kJ/m <sup>2</sup> Jour)	4569	8177	12174	15061	18254	21500	18500	16677	11348	7453	4081	3097
	Humidité (%)	73	72	73	74	71	74	78	78	78	77	79	74
	Vent (m/s)	5.53	5.17	5.47	5.08	4.92	4.36	3.94	4.00	4.30	4.56	5.00	5.36
La Pocatière	Température (°C)	-11.3	-10.2	-4.4	2.8	9.9	15.7	18.7	17.3	12.6	6.9	0.4	-8.2
	Rayon. (kJ/m <sup>2</sup> Jour) <sup>ii</sup>	5171	8830	14117	16742	18985	20996	20051	16966	12780	8047	4523	4097
	Humidité (%) <sup>iii</sup>	76	76	75	73	70	71	73	74	76	75	78	78
	Vent (m/s) <sup>iv</sup>	4.36	4.39	4.47	4.08	3.75	3.64	3.47	3.33	3.42	4.00	4.06	4.17
Montréal Int'l A. (Mirabel)	Température (°C)	-9.9	-8.8	-2.3	5.9	12.8	18.5	21.2	19.9	15.3	9.4	2.3	-6.6
	Rayon. (kJ/m <sup>2</sup> Jour)	5337	8540	12435	16082	18818	20103	20952	17130	13170	8244	4474	3815
	Humidité (%)	75	74	71	67	64	69	70	72	75	74	77	78
	Vent (m/s)	5.08	4.97	4.97	4.69	4.25	4.03	3.64	3.39	3.64	4.11	4.61	4.67

i Les températures sont données par le thermomètre sec

ii Le rayonnement journalier à la ville de La Pocatière provient de l'interpolation linéaire entre celui à la ville de Québec et celui à la ville de Rivière du Loup

iii L'humidité relative à la ville de La Pocatière provient de celle à la ville de Mont-Joli

iv Le vent à la ville de La Pocatière provient des données de la ville de Rivière du Loup

Rem : Les interpolations pour la ville de La Pocatière ont toujours été réalisées avec les données connues des villes les plus proches ou d'une ville côtière.

Ces valeurs brutes ne permettent pas de connaître l'évolution des conditions à chaque heure, à l'intérieur du mois. Pour remédier à ce manque, le logiciel commercial TRNSYS permet de générer des valeurs horaires à partir de données moyennes mensuelles. Le logiciel utilise diverses corrélations pour la génération de ces données dont la méthodologie est décrite par Knight et al. [17]. Notons que la corrélation déterministe a été retenue.

Troisièmement, il faut déterminer quel sera la constitution du sol sous la serre. Gauthier et al. [9] ont établi une configuration typique du sol et de la fondation isolée d'une serre. Les caractéristiques de ce sol sont données à la Figure 5.1 et au TABLEAU 5.2.



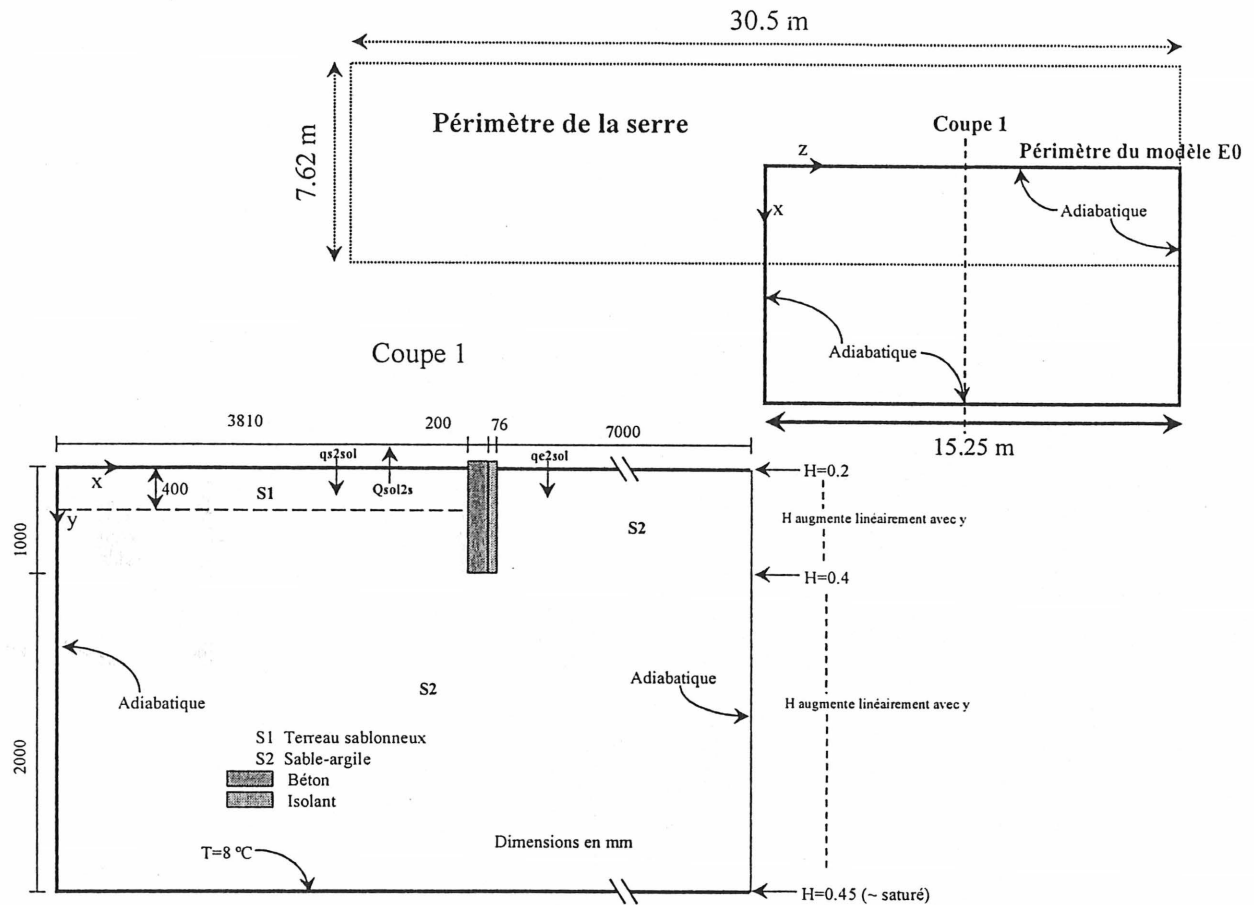


Figure 5.1 : Modélisation du sol

TABEAU 5.2 : PROPRIETES PHYSIQUES DU SOL ET DE LA FONDATION ISOLEE

Élément	P	$k_{cte}$ (W/mK)	$k_H$ (W/mK)	$C_{cte}$ (J/m <sup>3</sup> K)	$C_H$ (J/m <sup>3</sup> K)
S1, terreau sablonneux	0.6	0.7	1.4	$8.19 \times 10^5$	$4.2 \times 10^6$
S2, sable-argile	0.45	1.2	3.0	$1.26 \times 10^6$	$4.2 \times 10^6$
Béton	n.a.	0.72	n.a.	$1.45 \times 10^6$	n.a.
Isolant polystyrène	n.a.	0.027	n.a.	$6.65 \times 10^4$	n.a.

Finalement, après avoir déterminé les caractéristiques de construction de la serre, la période et les conditions d'exploitation de celle-ci, les conditions météorologiques horaires et la constitution du sol, nous sommes prêts à simuler le comportement thermique d'une serre typique.

Bien que cette simulation nous donne une foule de renseignements différents, ce n'est que le besoin en chauffage annuel de la serre qui nous intéresse présentement. Le TABLEAU 5.3 nous expose les principaux résultats de cette partie de l'étude.

TABLEAU 5.3 : BESOINS EN CHAUFFAGE D'UNE SERRE TYPIQUE, SANS ECHAS, DU 1<sup>ER</sup> FEVRIER AU 31 OCTOBRE, POUR DIFFERENTES TEMPERATURES DE CONFORT

Localité	T <sub>Jour</sub> (°C)	T <sub>Nuit</sub> (°C)	Chauffage requis (kJ)
Sept-Îles	24	16	6,8434 <sup>E</sup> +08
	22	18	6,9682 <sup>E</sup> +08
	20	18	6,7086 <sup>E</sup> +08
	24	14	6,4406 <sup>E</sup> +08
La Pocatière	24	16	5,1952 <sup>E</sup> +08
	22	18	5,3065 <sup>E</sup> +08
	20	18	5,0992 <sup>E</sup> +08
	24	14	4,8668 <sup>E</sup> +08
Montréal	24	16	4,5514 <sup>E</sup> +08
	22	18	4,6130 <sup>E</sup> +08
	20	18	4,4092 <sup>E</sup> +08
	24	14	4,2594 <sup>E</sup> +08

Tel que prévu, la demande en chauffage s'accroît pour les localités plus nordiques et pour des températures de confort plus élevées, surtout celles de nuit.

## 5.2 Configuration des systèmes ÉCHAS étudiés

La prochaine étape des simulations consiste à ajouter aux serres un système ÉCHAS pour stocker et récupérer les excédants de chaleur le jour. Par contre, de tels systèmes peuvent avoir bien des façons de s'agencer dans le sol. Le seul paramètre fixe est la nature des conduits

utilisés, soit des tuyaux flexibles en PVC de 102 mm (4 pouces) de diamètre. De plus, la vitesse d'écoulement dans les conduits a été établie à 4 m/s. D'après les résultats d'une étude paramétrique [9], il a été établi qu'une vitesse de 4 m/s constituait une vitesse optimale en ce qui concerne les échanges thermiques entre les conduits et le sol. Les performances augmentent linéairement avec la vitesse de l'écoulement jusqu'à 4 m/s. À plus de 4 m/s le taux d'augmentation des performances avec la vitesse diminue. Aussi, la perte de charge dans les conduits augmente de façon quadratique avec la vitesse.

### 5.2.1 L'ÉCHAS étendu

Le premier système étudié sera un ÉCHAS où 2 rangées de tuyaux couvrent presque toute la surface du plancher de la serre, tel que celui construit à La Pocatière [8]. La Figure 5.2 schématise bien ce type de système.

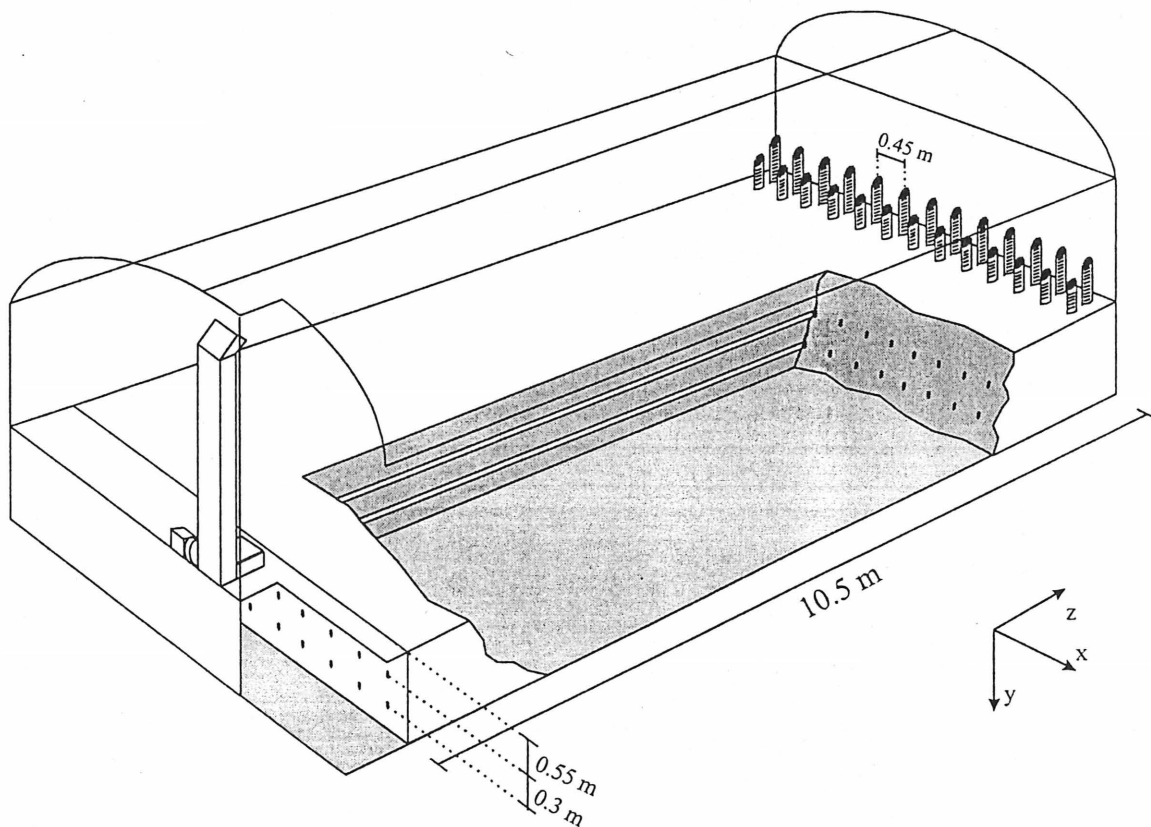


Figure 5.2 : Représentation de l'ÉCHAS étendu

Toutefois, contrairement à cette serre (Figure 5.2), nous ajoutons une couche d'isolant de polystyrène sous la dernière rangée de tuyaux afin de confiner l'espace de stockage chaleur et ainsi augmenter la quantité de chaleur stockée récupérable [9]. Dans une serre de dimensions (30.5X7.62)m<sup>2</sup> le système ÉCHAS étendu est disposée en deux parties. Le plénum de distribution d'air est situé au centre perpendiculairement à l'axe principal de la serre. L'air est donc recueillie au centre de la serre (dans le faite le jour et près du sol la nuit) et circule dans les conduits en direction des bouts de la serre. Aux extrémités de la serre, deux plénums collectent l'air sortant du système et la redistribue dans la serre.

La longueur des conduits est de 14.5m. Le nombre total de sections de conduits (14.5 m) a été évalué à partir de l'expérience de La Pocatière. Le moteur (750 Watts) du ventilateur du système ECHAS de La Pocatière était en mesure de fournir un écoulement d'air de 4 m/s dans 312 m de conduits. La surface de la serre étant environ 4 fois celle de La Pocatière, nous allons considérer que les ventilateurs (3000 W) du système peuvent fournir un écoulement de 4 m/s dans environ 1250 m de conduits. La configuration adoptée sera donc 21 paires de conduits superposés de part et d'autres du plénum central, soit  $21 \times 2 \times 14.5 = 1218$  m de conduits. La distance horizontale entre les conduits (centre à centre) =  $7.62 \text{ m} / 21 = 0.363 \text{ m}$ . La distance verticale entre les conduits (centre à centre) = 0.363 m. La profondeur du premier conduit (surface à centre) = 0.448 m. La Figure 5.2 montre la moitié gauche d'une vue en coupe du sol qui illustre bien la configuration de ce système.

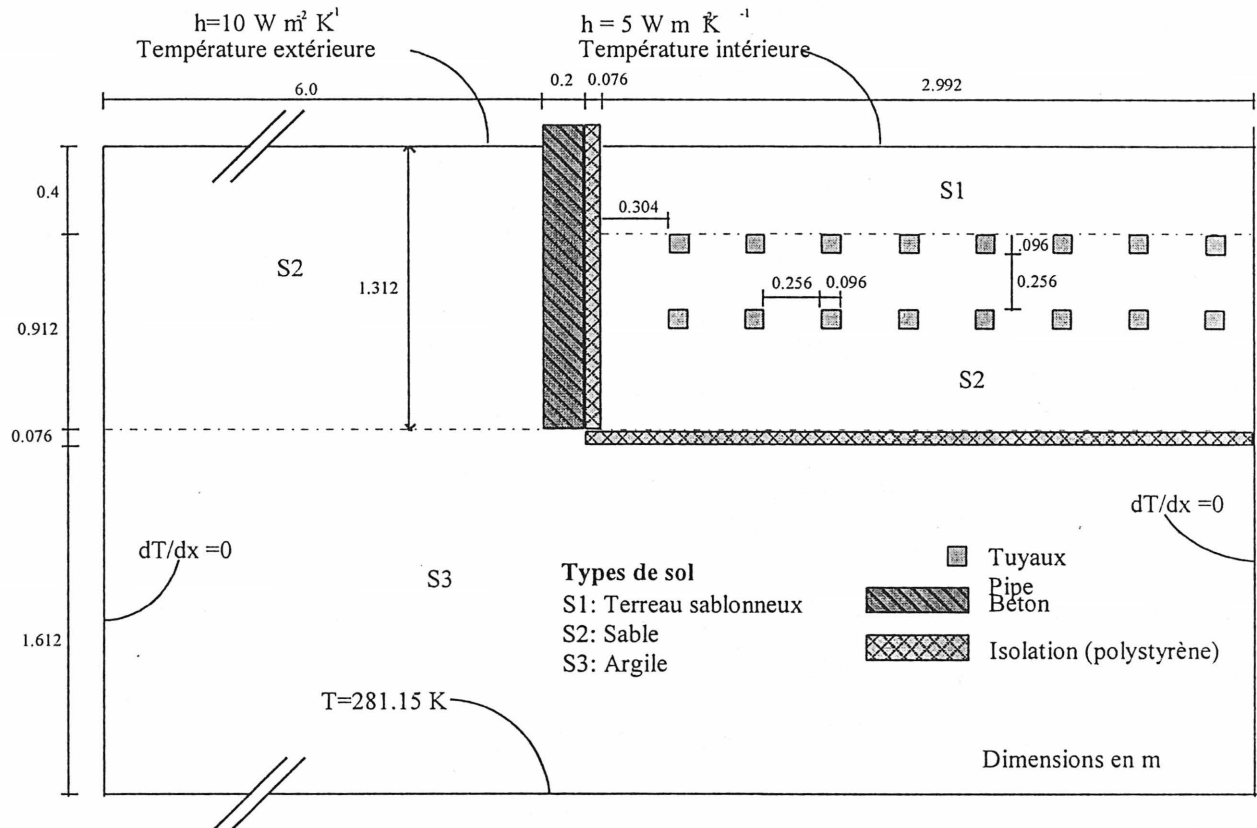


Figure 5.3 : Modèle de l'ÉCHAS étendu

### 5.2.2 La tranchée isolée

Afin de répondre davantage aux besoins des serriculteurs tout en maintenant un bon niveau de performance de l'ÉCHAS, une autre disposition des conduits est envisagée : la tranchée isolée. En effet, les serriculteurs veulent des systèmes de stockage de la chaleur les moins encombrants et les moins coûteux à l'achat possibles [3]. En confinant les conduits de PVC dans une tranchée de sol restreinte, mais qui serait entièrement isolée, nous répondons à ce besoin, tout en ne sacrifiant pas la capacité de stockage/récupération de la chaleur. De plus, cette tranchée pourrait facilement être maintenue saturée en eau, ce qui augmente la quantité de chaleur pouvant être stockée [9]. À prime abord, une tranchée type est modélisée, tel que représentée à la Figure 5.4. Ensuite, elle sera modifiée afin de quantifier l'effet de divers facteurs sur l'économie

de chauffage : nombre de conduits, longueur et distance centre à centre des conduits, sol humide ( $H=0,2$ ) ou saturé en eau ( $H=0,45$ ). Le TABLEAU 5.4 énonce les différentes configurations de tranchée qui sont étudiées.

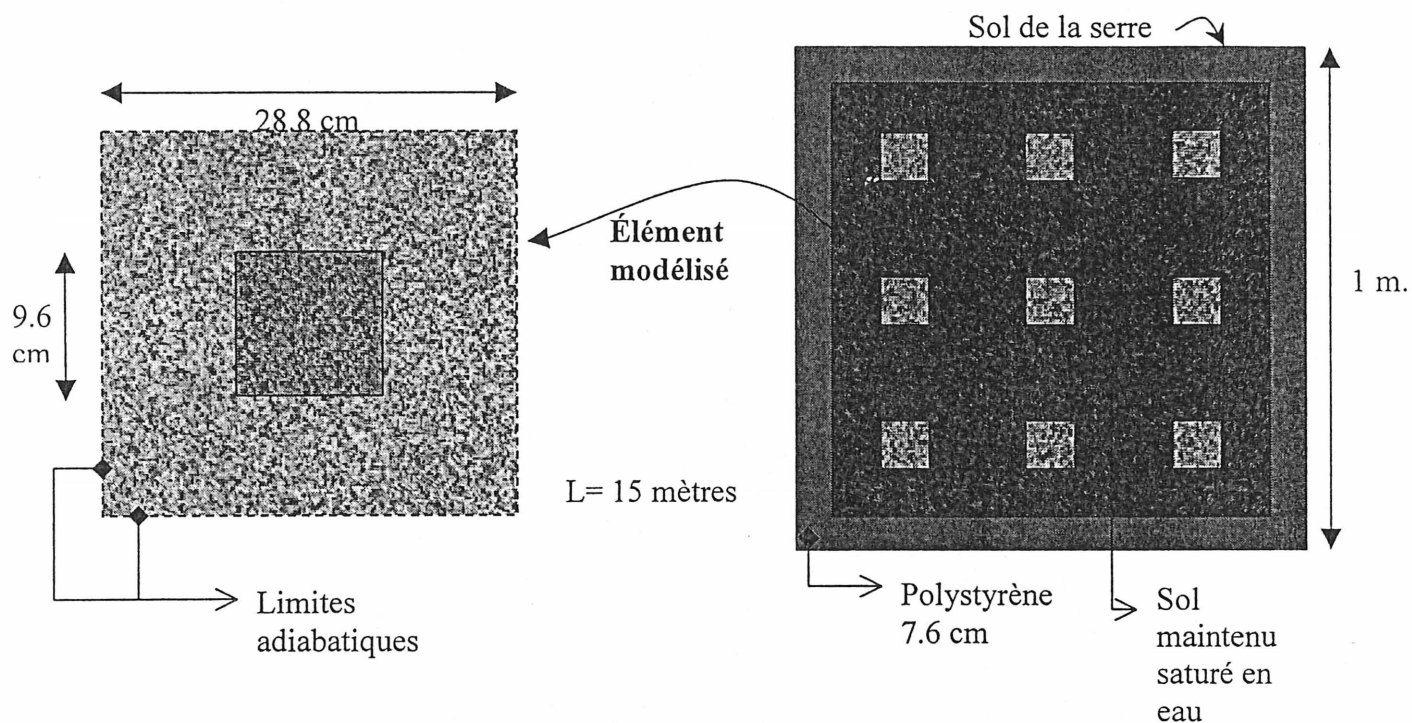


Figure 5.4 : Vue en coupe de l'ÉCHAS en tranchée isolée (configuration T0)

TABLEAU 5.4 : CARACTERISTIQUES DES ECHAS EN TRANCHEE ISOLEE

Configuration	Les conduits			Sol maintenu saturé en eau
	Nombre	Longueur (m)	Distance centre à centre (m)	
T0	9	15	0,288	Oui
T1	9	15	0,288	Non
T2	9	15	0,144	Oui
T3	9	15	0,432	Oui
T4	9	10	0,288	Oui
T5	18	15	0,288	Oui
T6	36	15	0,288	Oui
T7	20	15	0,432	Oui

Maintenant que les systèmes à étudier ont bien été définis, la section suivante discutera des résultats obtenus suite à la simulation numérique de ceux-ci.

## 6. RESULTATS ET DISCUSSION

Le but des simulations est de bien comprendre la dynamique thermique des serres munies d'un ÉCHAS. Toutefois, le résultat qui importe est l'ordre de grandeur des économies de chauffage issues de l'utilisation de ce genre de système de stockage. Cette section décortiquera ces résultats afin de déterminer quels sont les facteurs qui influencent l'efficacité de tels systèmes et, surtout, quel est leur véritable potentiel.

### 6.1 Observations générales

Tous les scénarios décrits à la section précédente ont été simulés numériquement, ce qui amène plusieurs résultats intéressants. Un exemple de fichier d'entrée d'une simulation est inclus à l'annexe B. Avant de présenter en détails ces résultats, quelques tendances observées peuvent être présentées :

Tout d'abord, les ÉCHAS ont bel et bien diminué la demande en chauffage des serres étudiées, mais, dans la plupart des cas, à un niveau relativement bas. Les serres situées dans une zone climatique plus clémente bénéficient de meilleures performances du système. D'autres facteurs viennent améliorer son efficacité, dont la présence d'isolation sur le pourtour de l'ÉCHAS (diminue les pertes de chaleur), l'augmentation du contenu en eau du sol (favorise le stockage dans le sol) et l'intégration du système à la ventilation normale de la serre (meilleure utilisation des ressources). De plus, la stratégie adoptée par le serriculteur pour les températures d'exploitation de la serre viennent affecter la contribution de l'ÉCHAS au chauffage de la serre. En effet, si on maintient la température à l'intérieur de la serre basse pendant le jour, plus de chaleur sera stockée dans le sol. Puis, la nuit, plus on veut maintenir la température basse dans la serre, plus la chaleur pouvant être récupérée dans le sol augmente. D'ailleurs, c'est la température de nuit qui vient influencer davantage l'économie de chauffage.

En second lieu, les résultats montrent bien, tel que décrit par Lemay [5], que certaines semaines, contrairement à d'autres, profitent grandement de la présence d'un ÉCHAS. Ce sont



surtout des semaines printanières et automnales, où la température extérieure et le surtout rayonnement solaire sont relativement hauts (beaucoup de stockage), et où les nuits sont plus fraîches (beaucoup de récupération).

Pour terminer cette section, définissons deux termes qui seront très employés dans la prochaine partie : l'économie de chauffage et l'économie d'énergie. Ces termes, exprimés en pourcentage (%), décrivent l'efficacité du système ÉCHAS analysé. Le terme « économie d'énergie » tient compte, en plus de l'économie de chauffage, de l'énergie dépensée par les moteurs des ventilateurs de l'ÉCHAS. Dans les deux équations ci dessous, É.Ch. signifie économie de chauffage [%], et É.Én. signifie économie d'énergie [%].

$$\text{É.Ch.} = \frac{(\text{Chauffage requis sans ÉCHAS} - \text{Chauffage requis avec ÉCHAS})[\text{kJ}]}{\text{Chauffage requis sans ÉCHAS}[\text{kJ}]} * 100 \quad (19) \quad (21)$$

$$\text{É.Én.} = \text{É.Ch.} - \frac{\text{Énergie consommée par les moteurs de l'ÉCHAS}[\text{kJ}]}{\text{Chauffage requis sans ÉCHAS}[\text{kJ}]} * 100 \quad (20) \quad (22)$$

## 6.2 L'ÉCHAS étendu

Les premières simulations numériques d'une serre munie d'un système de stockage de chaleur dans les sol ont été faites avec un ÉCHAS étendu, semblable à celui construit à la serre expérimentale de La Pocatière, tel que représenté à la Figure 5.2. Quelques scénarios différents ont été étudiés afin de qualifier l'influence du climat, des températures de confort et de la présence d'isolation sous l'ÉCHAS sur les économies de chauffage réalisées.

À prime abord, on remarque que les économies de chauffage annuelles réalisées avec un tel système ne sont pas très significatives: de l'ordre de 8%. Bien sûr, cette valeur change selon les conditions d'exploitation de la serre étudiée.

### 6.2.1 Influence du climat extérieur

Premièrement, l'effet du climat extérieur est examiné. Pour ce faire, trois serres identiques munies d'un ÉCHAS étendu, sans isolation au dessous de la dernière rangée de tuyaux, sont simulées. Nous appelons ce système E1. De plus, les températures de confort dans la serre sont de 22°C la jour et 18°C la nuit. La seule différence entre ces trois serres réside dans leur localité géographique: une à Sept-Îles, une à La Pocatière et une à Montréal. Le tableau suivant montre les économies réalisées grâce à l'ÉCHAS sur une période de culture de 9 mois (février à octobre).

TABLEAU 6.1 : INFLUENCE DU CLIMAT SUR LA PERFORMANCE D'UN ÉCHAS ÉTENDU

Localité	Économie de chauffage (%)	Économie d'énergie (%)
Sept-Îles	7.09	2.02
LaPocatière	9.95	2.94
Montréal	6.73	-0.26

Ce tableau montre, contrairement à nos attentes, que l'économie de chauffage est moindre dans la région de Montréal que dans les deux autres régions plus nordiques. De plus, si l'on tient compte de l'énergie requise pour faire fonctionner l'ÉCHAS, nous avons une économie d'énergie négative pour cette région, soit une dépense supplémentaire en énergie.

Afin d'expliquer ce phénomène, il faut analyser la performance de l'ÉCHAS (voir section 2.3), soit le ratio  $\text{Énergie récupérée} / \text{Énergie stockée} \times 100$ . Pour Montréal, cette valeur est de 51%. Pour Sept-Îles et LaPocatière, ces valeurs sont de 69% et 66% respectivement. Ce sont les valeurs prévues par Gauthier et al. [9] par leur modèle de transfert de chaleur dans un sol muni de conduits d'air. La performance est très similaire entre Sept-Îles et La Pocatière, cette dernière est toutefois légèrement avantagée par ses températures extérieures plus clémentes, ce qui se traduit par plus de chaleur stockée, donc plus d'économies de chauffage. Par contre, à Montréal, les

nuits plus chaudes ne permettent pas à l'ÉCHAS de céder autant de chaleur à la serre, même s'il en stocke plus le jour. Ce phénomène laisse le temps à la chaleur de se diffuser profondément dans le sol, puisqu'il n'y a pas d'isolation sous l'ÉCHAS. À ce moment, la chaleur stockée devient irrécupérable; cela résulte en de moindres performances de l'ÉCHAS, donc moins d'économies de chauffage.

#### 6.2.2 Influence des températures d'exploitation de la serre

Deuxièmement, on analyse l'effet des températures de confort régnant dans la serre. Les serriculteurs utilisent différentes températures afin d'assurer la croissance optimale de leur cultures. Règle générale, ils essaient de maintenir une température cible la jour et une autre, plus basse, la nuit. Quatre paires de température jour/nuit typiques ont été étudiées: 24°C/14°C, 24°C/16°C, 22°C/18°C et 20°C/18°C. Ces températures sont soumises à des simulations représentant 9 mois (février à octobre) de culture dans une serre de la région montréalaise munie d'un ÉCHAS étendu. Le tableau suivant montre les économies réalisées avec une telle serre, par rapport à la même serre sans ÉCHAS.

TABLEAU 6.2 : INFLUENCE DES TEMPÉRATURES DE CONFORT SUR LA PERFORMANCE D'UN ÉCHAS ÉTENDU

T° jour / T° nuit (°C)	Économie de chauffage (%)	Économie d'énergie (%)
24 / 14	2.54	-3.83
24 / 16	4.13	-2.48
22 / 18	6.74	-0.26
20 / 18	7.38	0.71

Plus la température de jour est basse, plus l'ÉCHAS sera performant et efficace (cas 22/18 et 20/18). Aussitôt que la serre atteint sa température de jour, tout surplus de chaleur est évacué à l'extérieur, en passant par les conduits de l'ÉCHAS dans le sol. Plus cette température de jour est basse, plus la quantité de chaleur emmagasinée dans le sol sera importante. De plus, pour les cas

24/14 et 24/16, nous notons une meilleure économie de chauffage dans le cas où la température de nuit est de 16°C, au lieu de 14°C. Ceci s'explique par le fait que les jours où les conditions extérieures sont favorables à un grand stockage de chaleur coïncident avec les jours où la température extérieure la nuit est relativement haute, donc moins de récupération de chaleur est faite. Par contre, si le serre doit être maintenue à 16°C la nuit, l'ÉCHAS peut contribuer davantage à la tâche.

### 6.2.3 Influence de l'isolation de dessous de l'ÉCHAS

Maintenant que l'effet des conditions climatiques et des températures de confort ont été qualifiés, on analyse l'effet d'installer une couche de polystyrène isolant sous la dernière rangée de conduits de l'ÉCHAS. Cette isolation est requise afin de diminuer la quantité de chaleur pouvant se diffuser loin dans le sol et ainsi ne pouvant plus être récupérée par l'air circulant dans les conduits. La performance de l'ÉCHAS devrait en être améliorée.

Pour quantifier l'effet de cette isolation, deux scénarios, toujours sur 9 mois avec un ÉCHAS étendu, sont simulés. Le premier est fait sur une serre de la région montréalaise qui a comme de températures de confort 22°C le jour et 18°C la nuit. La deuxième serre est identique, sauf qu'elle est située dans la région de LaPocatière. Notons que les températures 22/18 sont celles les plus populaires actuellement en serriculture. Le tableau suivant montre les résultats obtenus avec de tels scénarios, comparativement aux mêmes scénarios, mais sans isolation du dessous du système.

TABLEAU 6.3 : INFLUENCE DE L'ISOLATION DU DESSOUS D'UN ÉCHAS SUR L'ÉCONOMIE D'ÉNERGIE

Localité	Sans isolation du dessous		Avec isolation du dessous	
	É.Chauffage (%)	É.Énergie (%)	É.Chauffage (%)	É.Énergie (%)
Montréal	6.74	-0.26	16.19	10.14
La Pocatière	9.95	2.94	20.3	13.50

Ces résultats sont très intéressants. En effet, l'économie d'énergie issue de tels systèmes commence à être significative. Cela montre que l'ÉCHAS a une bonne capacité de stockage de chaleur et qu'en isolant le dessous de celui-ci, on peut augmenter grandement sa performance.

Enfin, bien que ces scénarios renseignent sur la dynamique thermique de l'ÉCHAS, ils sont néanmoins relativement peu performants au point de vue énergétique (maximum 13,5% d'économie d'énergie).

L'énergie requise pour faire circuler l'air à travers un tel étendu de conduits est telle qu'elle se compare à (et même parfois dépasse) l'énergie sauvée en chauffage. Nous savons aussi que la présence d'isolation autour de l'ÉCHAS augmente grandement sa performance. Voilà pourquoi l'efficacité d'un ÉCHAS plus petit, confiné en une tranchée de sol isolée sur tout son pourtour a été analysée. Est-ce que la diminution d'énergie requise pour faire circuler l'air dans cette tranchée sera considérable? Est-ce que la chaleur pouvant être stockée sera sensiblement la même? La section suivante tentera de répondre à ces questions.

### **6.3 L'ÉCHAS en tranchée isolée**

Les prochaines configurations de l'ÉCHAS à étudier sont décrites dans la section 5.2.2. Ce sont tous des variations de ce qui se nomme "l'ÉCHAS en tranchée isolée". Cette fois, au lieu de couvrir l'ensemble de l'espace sous le plancher de la serre, le réseau de conduits est confiné en une tranchée de 1m X 1m X 15m. Cette tranchée contient 9 conduits d'air et est entièrement isolée sur son pourtour par du polystyrène de 7.6 cm. Le terreau sablonneux dans la tranchée est maintenu saturé en eau afin d'augmenter sa capacité de stockage de chaleur [9]. Cette configuration se nomme T0 et un schéma de sa disposition dans la serre est présenté à la Figure 6.1.

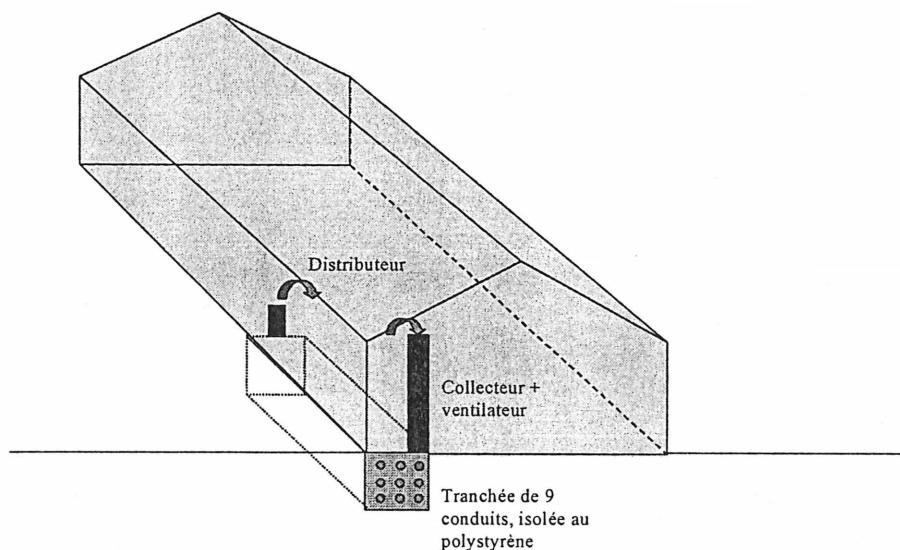


Figure 6.1: Schéma d'un ÉCHAS en tranchée isolé sous une serre

Différentes serres ont été simulés sur 9 mois avec un tel ÉCHAS. Le tableau suivant montre les économies réalisées en fonction de la serre étudiée. Encore une fois, les économies proviennent de la comparaison avec la même serre, mais sans ÉCHAS.

TABLEAU 6.4 : ÉCONOMIES RÉALISÉES AVEC UN ÉCHAS EN TRANCHÉE (T0)

Localité	T° jour / T° nuit (°C)	É.Chauffage (%)	É.Énergie (%)
Sept-Îles	22 / 18	2.87	2.22
La Pocatière	22 / 18	4.18	3.30
Montréal	22 / 18	4.49	3.58
Montréal	20 / 18	4.45	3.64
Montréal	24 / 16	5.00	4.15
Montréal	24 / 14	5.50	4.68

Comparativement à l'ÉCHAS étendu, les économies de chauffage sont plus modestes. Par contre, l'écart entre l'économie de chauffage et l'économie d'énergie a été beaucoup réduit, tel qu'escompté. En effet, un ventilateur moins puissant est requis pour faire fonctionner l'ÉCHAS en tranchée, ce qui explique ce meilleur rendement énergétique.

Malgré le fait que l'économie en chauffage n'est pas très bonne, ce type d'ÉCHAS est très prometteur, puisqu'il apporte tout de même plus de performance par volume de sol occupé que l'ÉCHAS étendu. Voilà pourquoi la prochaine section étudiera davantage cette tranchée en faisant varier certains paramètres de configuration, afin d'en augmenter l'efficacité.

#### 6.3.1 Variations de la tranchée

Dans la section 5.2.2, diverses variations de la tranchée isolée ont été présentées. Le TABLEAU 5.3 présente 7 variations du modèle original de l'ÉCHAS en tranchée. Le but est de simuler le comportement thermique de serres (sur 9 mois) munies de ces ÉCHAS, afin de quantifier l'effet de certains paramètres sur le performance de ceux-ci: distance centre à centre entre les conduits, quantité d'eau dans le sol, nombre et longueur des conduits.

Le tableau suivant présente le résultat de ces simulations, ainsi que les caractéristiques déjà décrites au TABLEAU 5.3. Pour fin de comparaison, toutes les simulations sont faites sur des serres de la région montréalaise fonctionnant avec des températures de confort de 22°C le jour et 18°C la nuit.

**TABLEAU 6.5 : ÉCONOMIES RÉALISÉES AVEC DIFFÉRENT TYPES D'ÉCHAS EN TRANCHÉE**

<b>Config.</b>	<b>Nombre de conduits</b>	<b>Longueur des conduits (m)</b>	<b>Distance c.à.c. entre conduits</b>	<b>Sol maintenu saturé en eau?</b>	<b>Économie de chauffage (%)</b>	<b>Économie d'Énergie (%)</b>
T0	9	15	0,288	Oui	4.49	3.58
T1	9	15	0,288	Non	4.46	3.56
T2	9	15	0,144	Oui	4.19	3.37
T3	9	15	0,432	Oui	4.62	2.42
T4	9	10	0,288	Oui	3.81	3.36
T5	18	15	0,288	Oui	5.65	4.71
T6	36	15	0,288	Oui	8.92	7.44
T7	20	15	0,432	Oui	7.21	6.23

À prime abord, ces modifications de la tranchée semblent n'influencer guère le rendement global du système. Des variations de l'ordre de 1% d'économie d'énergie sont engendrées par la plupart de ces modifications. Par contre, certaines tendances sont cernées:

- ◆ Premièrement, le facteur qui influence le plus la performance de l'ÉCHAS est le nombre de conduits qu'il contient; plus il y en a, plus il y a de chaleur pouvant être stockée et récupérée.
- ◆ Deuxièmement, un autre facteur est à considérer, bien que moins influent sur la performance: la longueur des conduits. Une longueur inférieure à 15 mètres engendre une baisse de la capacité de stockage de chaleur de l'ÉCHAS.
- ◆ Troisièmement, ces simulations montrent très bien que le contenu en eau du sol et la distance entre les conduits influencent très peu l'économie de chauffage. Par contre, plus les conduits sont éloignées, plus la quantité d'air de la serre circulant dans l'ÉCHAS doit être grande afin que le transfert et la diffusion de chaleur se fasse complètement dans le sol. Ceci résulte en une demande accrue d'énergie du ventilateur de l'ÉCHAS, donc en une économie d'énergie moindre.



Finalement, l'ÉCHAS en tranchée peut être très intéressant, à moins qu'il y ait plusieurs conduits d'air dans la tranchée. Pour une serre fonctionnant dans les mêmes conditions, l'ÉCHAS étendu et isolé, avec ces 1218 mètres de conduits (84 conduits de 14,5 m.), apporte une économie d'énergie de 10,14% (TABLEAU 6.3). Tandis que la même serre, mais avec un ÉCHAS en tranchée comportant 540 mètres de conduits (36 conduits de 15 m.) apporte une économie d'énergie de 7,44%.

#### 6.4 L'ÉCHAS intégré à la ventilation normale de la serre

Une dernière possibilité d'exploitation de l'ÉCHAS reste à être étudiée, soit lorsque celui-ci est intégré à la ventilation normale de la serre (voir section 4.6.2). Pour quantifier l'effet d'un tel mode de fonctionnement, trois simulations ont été faites dans la même veine que les précédentes. Ce sont des simulations sur 9 mois de culture dans la région montréalaise et trois plages de températures de confort sont utilisées. L'ÉCHAS greffé à ces serres est de type tranchée isolée, avec la configuration T0. Les résultats de ces simulations sont présentés au tableau suivant:

TABLEAU 6.6: INFLUENCE DE L'INTÉGRATION DE L'ÉCHAS (T0) À LA VENTILATION NORMALE DE LA SERRE

T° jour / T° nuit (°C)	ÉCHAS indépendant		ÉCHAS intégré à la ventilation	
	É. Chauffage (%)	É. Énergie (%)	É. Chauffage (%)	É. Énergie (%)
24 / 16	5.00	4.15	9.46	8.46
22 / 18	4.49	3.58	8.54	7.44
20 / 18	4.45	3.64	14.48	13.39

L'intégration de l'ÉCHAS à la ventilation permet de stocker davantage de chaleur dans la tranchée. En effet, au lieu d'évacuer les plus gros surplus de chaleur et d'humidité directement vers l'extérieur, ceux-ci passent par l'ÉCHAS auparavant. De plus, vu que la tranchée est isolée,

le taux de récupération de cette chaleur stockée est excellent. Ceci résulte en une bien meilleure efficacité du système. Lorsque la température de confort de jour est basse (20°C), encore plus de chaleur sera stockée; dans le même sens, lorsque la température de nuit est basse (16°C), encore plus de chaleur peut être récupérée. Ce sont des phénomènes attendus, mais leur influence dans ces cas est très marquée, surtout pour la température de jour.

Ces simulations confirment la bonne performance de l'ÉCHAS en tranchée. Si, en plus, de grandes quantités de chaleur peuvent être stockées le jour, l'ÉCHAS devient alors très efficace au niveau des économies réalisées.

## 6.5 Le COP de l'ÉCHAS

Lorsque le rendement énergétique d'un système thermique est étudié, il faut regarder au delà des simples économies de chauffage réalisées. Il faut aussi considérer quel est le coefficient de performance (COP) de l'appareil. Le COP exprime le ratio de l'énergie engendrée ou sauvée sur l'énergie dépensée pour y arriver. Dans le cas de l'ÉCHAS, le COP peut s'exprimer comme l'énergie calorifique apportée à la serre par l'air circulant dans l'ÉCHAS divisée par l'énergie requise pour faire fonctionner son(s) ventilateur(s).

$$\text{COP}_{\text{ÉCHAS}} = \text{Énergie transférée à la serre} / \text{Énergie dépensée par les ventilateurs} \quad (23)$$

Le tableau suivant montre ces valeurs de COP pour différentes simulations. Dans la colonne "Type d'ÉCHAS", "intégré" veut dire que le système est intégré à la ventilation normale de la serre.

TABLEAU 6.7: COP DE DIFFÉRENTS ÉCHAS SUR 9 MOIS DE SERRICULTURE

Localité	T° jour / T° nuit (°C)	Type d'ÉCHAS	COP de l'ÉCHAS
Montréal	24 / 14	Étendu	1.92
La Pocatière	22 / 18	Étendu	1.86
Sept-Îles	22 / 18	Étendu	1.90
Montréal	24 / 16	Étendu	1.98
Montréal	22 / 18	Étendu	1.67
Montréal	20 / 18	Étendu	1.40
Montréal	22 / 18	Étendu et isolé	2.64
La Pocatière	22 / 18	Étendu et isolé	2.72
Sept-Îles	22 / 18	Tranchée T0	2.30
La Pocatière	22 / 18	Tranchée T0	2.38
Montréal	22 / 18	Tranchée T0	2.44
Montréal	24 / 14	Tranchée T0	3.12
Montréal	24 / 16	Tranchée T0	2.85
Montréal	20 / 18	Tranchée T0	2.41
Montréal	24 / 16	Tranchée T0, intégré	5.12
Montréal	22 / 18	Tranchée T0, intégré	4.45
Montréal	20 / 18	Tranchée T0, intégré	4.05
Montréal	22 / 18	Tranchée T5	4.76
Montréal	22 / 18	Tranchée T6	6.20
Montréal	22 / 18	Tranchée T7	5.32

Les COP trouvés varient de 1.40 à 6.20, ce qui est très bien puisque l'ÉCHAS fournit toujours au moins 40% plus d'énergie à la serre qu'il en consomme pour fonctionner. Dans tous les cas, ce sont toujours les mêmes facteurs qui améliorent le COP: basse température de nuit (plus de chaleur fournie à la serre par l'ÉCHAS), petit ÉCHAS (moins d'énergie requis pour fonctionner) et ÉCHAS intégré à la ventilation (plus de chaleur stockée).

Dans le cas de l'ÉCHAS intégré à la ventilation, le COP ne tient pas compte de l'énergie supplémentaire requise aux ventilateurs normaux de la serre afin de forcer l'écoulement de l'air dans les conduits de l'ÉCHAS avant d'être évacué à l'extérieur. Donc dans ces cas, le COP est surévalué. En effet, pour faire passer l'air à évacuer par les conduits de l'ÉCHAS avant d'aller à l'extérieur, il faut vaincre certaines pertes de charge supplémentaires. Cela se traduit par une puissance supplémentaire requise au ventilateur normal d'évacuation, qui est habituellement installé directement à un mur de la serre. Cette puissance supplémentaire devrait être ajoutée à l'énergie requise par l'ÉCHAS (ajouter au dénominateur de la formule du COP). Cela aura pour effet de diminuer quelque peu le COP, mais pour de petits ÉCHAS, ce phénomène est moindre.

Tout de même, les meilleurs COP sont enregistrés pour des ÉCHAS en tranchée, mais avec plus de 9 conduits (T5, T6 et T7).

## **6.6 L'efficacité de l'ÉCHAS dans le temps**

Jusqu'à présent, il a été démontré qu'une certaine économie d'énergie peut être atteinte avec un ÉCHAS. Les économies présentées couvrent neuf mois d'exploitation de la serre, soit de février à octobre inclusivement. Il serait intéressant de savoir, au cours de ces neuf mois, quels sont les semaines qui bénéficient le plus de la présence de l'ÉCHAS. Autrement dit, quels sont les périodes de l'année où l'ÉCHAS contribue le plus au chauffage de la serre. Selon Bernier [8] et Lemay [9], ces périodes devraient se situer au printemps et au début de l'automne, périodes pendant lesquelles le rayonnement solaire engendre des surplus de chaleur le jour alors que les nuits plus fraîches font démarrer le système de chauffage de la serre.

Afin de vérifier ces faits, il faut analyser les résultats de quelques simulations déjà faites. Plus précisément, il faut examiner quel est la quantité d'énergie transférée à la serre par les conduits de l'ÉCHAS (Qcond). Qcond est calculé à chaque pas de temps et pour chaque conduit modélisé, de la façon suivante:

$$Q_{\text{cond}} = m_c C_{p_c} \Delta T_c t \quad (24)$$

où  $m_c$  est le débit d'air circulant dans les conduits de l'ÉCHAS

$C_{p_c}$  est la capacité calorifique de cet air

$\Delta T_c$  est l'écart de température entre l'air et le conduit

$t$  est le pas de temps

Le graphique suivant illustre la quantité d'énergie transférée à chaque jour pour une simulation typique de neuf mois de serriculture. Le cas illustré est celui d'une serre de La Pocatière munie d'un ÉCHAS étendu et isolé sur son dessous, fonctionnant avec une température de 22°C le jour et 18°C la nuit.

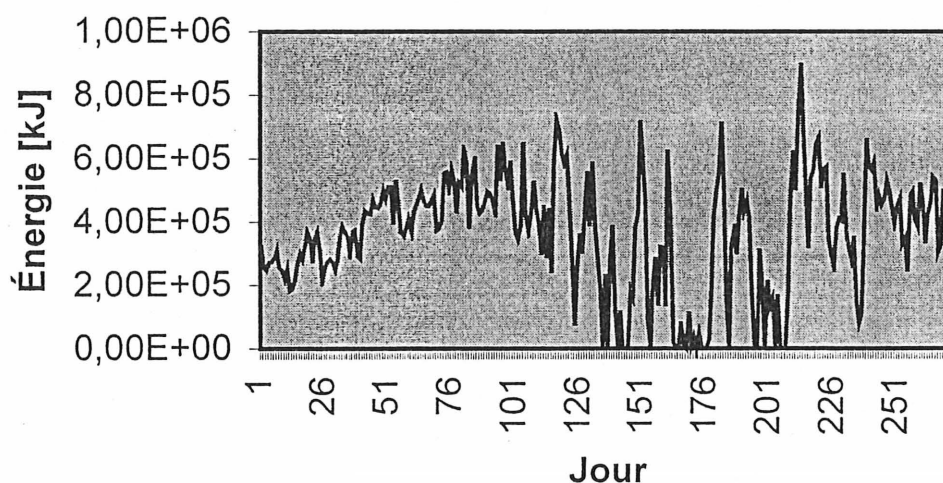


Figure 6.2 : Énergie transférée quotidiennement à la serre par l'ÉCHAS

Ce graphique démontre bien l'évolution de l'apport énergétique de l'ÉCHAS à la serre: Au début de l'année, l'ÉCHAS contribue tout de même au chauffage de la serre, mais à un niveau moindre; cette contribution vient essentiellement du fait que le sol de l'ÉCHAS est préchauffé avant le début de la saison sericole. À l'approche du printemps, l'ÉCHAS contribue de façon croissante et régulière à l'apport en chaleur de la serre et ses meilleures contributions sont réalisées autour du centième jour de simulation, soit vers le mois de mai. Ensuite, pour la période de l'été, l'apport énergétique du système est très variable, étant donné qu'il ne peut céder sa chaleur que lors des nuits plus fraîches de l'été. À ce moment, son apport est considérable, puisque plus de chaleur est stockée qu'ailleurs dans l'année. Ces variations s'atténuent avec l'arrivée de l'automne où de bons apports d'énergie thermique de l'ÉCHAS à la serre sont de nouveau enregistrés régulièrement. Ces résultats corroborent tout à fait avec les travaux de Bernier et Lemay [8,9].

## **6.7 La panne de chauffage**

Il reste un dernier point intéressant sur les ÉCHAS à analyser: leur contribution lors d'une panne de chauffage. Lors de périodes fraîches, le système de chauffage de la serre assure une certaine température ambiante afin d'assurer la survie des cultures. Si ce système tombe en panne, est-ce que l'ÉCHAS peut réussir à maintenir la température dans la serre à un niveau acceptable pendant un certain temps?

Afin de vérifier ce fait, quelques simulations ont été conduites. Celles ci consistent à imposer une panne de chauffage à la serre pendant la nuit tout en permettant aux ventilateurs de l'ÉCHAS de fonctionner. Ensuite, l'évolution de la température est enregistrée. Ceci a été fait pour divers scénarios possibles. Deux de ces scénarios sont présentés, étant donné qu'ils représentent très bien l'ensemble des tendances observées. Le graphique suivant montre l'évolution de la température ambiante dans la serre en fonction du temps, pour une serre de la région montréalaise avec des températures de confort de 22°C / 18°C dont le chauffage tombe en panne le 8 avril à minuit. Lors de cette nuit, la température atteint un minimum de 5°C. Deux

cas sont présentées pour cette serre: celle munie d'un ÉCHAS étendu et isolé sur son dessous, et celle munie d'un ÉCHAS en tranchée T0.

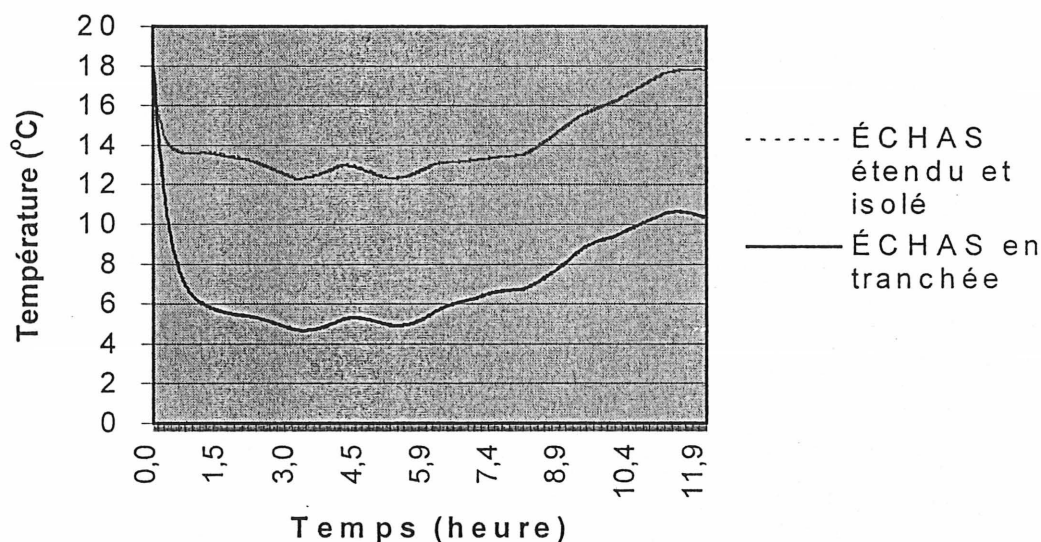


Figure 6.3 : Température de la serre en fonction du temps lors d'une panne de chauffage

Dès que la panne de chauffage a lieu, la température dans la serre chute rapidement, étant donné la faible inertie thermique de la serre. Au même moment, l'ÉCHAS cède sa chaleur à la serre. Après un certain temps, la chaleur cédée par l'ÉCHAS réussit à stabiliser la température dans la serre pour le cas de l'ÉCHAS étendu et isolé. Dans le cas de l'ÉCHAS en tranchée, celui-ci ne réussit jamais à maintenir la température dans la serre à un niveau acceptable et celle-ci finit par atteindre la température extérieure. Après un certain temps, dans les deux cas, la température dans la serre augmente de nouveau puisque c'est le lever du soleil.

Finalement, un ÉCHAS peut réussir à maintenir la température dans la serre à un niveau acceptable ( $>10^{\circ}\text{C}$ ) en cas de panne de chauffage, en autant que ce soit un ÉCHAS étendu. L'ÉCHAS étendu est celui qui contient une assez grande quantité de chaleur à céder à la serre afin d'empêcher une chute trop importante de sa température. Bien sûr, plus la température extérieure est fraîche, moins l'ÉCHAS peut contribuer à cette tâche.

Maintenant que l'ensemble des résultats sont analysés et que le comportement thermique de serres munies d'un système de stockage de chaleur souterrain est mieux compris, il ne reste plus qu'à conclure en émettant des recommandations claires sur la conception et l'utilisation de tels systèmes



## 7. CONCLUSION

Le comportement thermique d'une serre dans son ensemble fait intervenir plusieurs facteurs de nature différente. Les présents travaux de recherche ont permis de bien modéliser l'ensemble des facteurs non-négligeables intervenant dans le bilan et la dynamique thermique de serres québécoises typiques auxquelles on a greffé un système de stockage de chaleur de type ÉCHAS.

Le modèle numérique de la serre sur TRNSYS et celui du sol et de L'ÉCHAS sur Biko ont été développés et validés. La validation des modèles s'est faite grâce aux données recueillies à la serre expérimentale de l'ITA à La Pocatière, et à la comparaison des modèles avec ceux déjà existants. Le couplage des deux modèles a permis de faire une analyse paramétrique du comportement thermique de serres munies d'un ÉCHAS.

Les simulations faites pour différentes configurations possibles d'un système Serre-ÉCHAS amènent plusieurs résultats. Ces résultats, analysés au chapitre 6, permettent l'émission de diverses recommandations quant à la construction et l'exploitation d'ÉCHAS en serriculture :

- I. L'efficacité de l'ÉCHAS est grandement influencé par la stratégie d'exploitation de la serre. Une température de confort basse pendant le jour permet un plus grand stockage des surplus de chaleur. Aussi, si la température de confort de nuit est basse, elle permet à l'ÉCHAS de céder davantage de chaleur à la serre. La température de nuit influence davantage l'efficacité de l'ÉCHAS que celle de jour.
- II. Il est possible d'exploiter un ÉCHAS efficace au Québec, de la région montréalaise à la basse côte Nord. Par contre, les surplus de chaleur étant plus important au sud du Québec, les économies de chauffage seront plus appréciables dans la région montréalaise. Malgré ce fait, les serres plus nordiques profiteront davantage des capacités de l'ÉCHAS puisque celui-ci est beaucoup plus sollicité la nuit, où la température est très basse, donc presque toute la chaleur stockée sera récupérée à nouveau. En guise de comparaison, un climat désertique (très chaud le jour et très froid la nuit) serait idéal pour un ÉCHAS.

- III. Pour être performant (bon ratio Énergie récupérée/Énergie stockée), un ÉCHAS doit être isolé sur tout son pourtour. Une bonne isolation du sol de l'ÉCHAS est nécessaire afin de pouvoir récupérer convenablement la chaleur qu'il stock.
- IV. Un réseau de conduits étendu sous tout le plancher de la serre n'est pas nécessaire afin d'avoir un ÉCHAS efficace. Cela ne fait qu'augmenter les coûts d'énergie nécessaires au fonctionnement des ventilateurs dédiés à l'ÉCHAS, donc l'économie nette d'énergie est diminuée. Il vaut mieux confiner un plus petit nombre de conduits dans une tranchée isolée, ce qui coûte moins cher à l'achat et à l'exploitation, tandis que l'économie nette d'énergie demeure semblable.
- V. Pour un ÉCHAS en tranchée, les caractéristiques suivantes sont recommandés pour les conduits :
- ◆ Diamètre : 10,2 cm (4 pouces)
  - ◆ Longueur des conduits : 15 m
  - ◆ Distance centre à centre : environ 30 cm
  - ◆ Vitesse de l'écoulement d'air : 4 m/s
  - ◆ Nombre : le plus possible (pouvant être supportés par le ventilateur choisi)

De plus, la saturation du sol en eau influence peu l'efficacité de tels types d'ÉCHAS.

- VI. Le jour, en plus de faire circuler l'air chaud par l'ÉCHAS, l'évacuation des surplus (air trop chaud ou trop humide) de la serre doit se faire en passant auparavant par l'ÉCHAS. Donc, l'intégration de l'ÉCHAS à la ventilation normale de la serre contribue grandement à son efficacité.

En plus de ces 6 points, l'analyse des résultats a permis d'établir que :

- ◆ Le COP de l'ÉCHAS est toujours supérieur à 1 et celui ci augmente beaucoup en suivant les recommandations ci haut ;
- ◆ L'ÉCHAS contribue davantage au chauffage de la serre au printemps et à l'automne et encore plus lors des nuits d'été plus fraîches ;
- ◆ Lors d'une panne de chauffage en pleine nuit froide, plus l'ÉCHAS est volumineux, plus il réussira à maintenir la température dans la serre à un niveau adéquat.

De plus, l'ÉCHAS pourrait aussi être utile afin de chauffer le sol pendant l'été pour les cultures tardives automnales et pour refroidir l'air dans la serre (en circuit fermé) lors des journées trop chaudes.

Finalement, le projet ÉCHAS a permis d'établir que les systèmes ÉCHAS sont viables au Québec et que, lorsque bien conçus et utilisés, ils peuvent permettre des économies de chauffage annuelles d'au moins 15%. Ces résultats sont très intéressants puisqu'ils sont issus d'un système répondant bien aux besoins des serriculteurs : il est fort simple, peu coûteux et il occupe peu ou pas d'espace dans la serre.

## **ANNEXE A :**

### **Caractéristiques détaillés du modèle numérique d'une serre**

## Modèle de serre standard

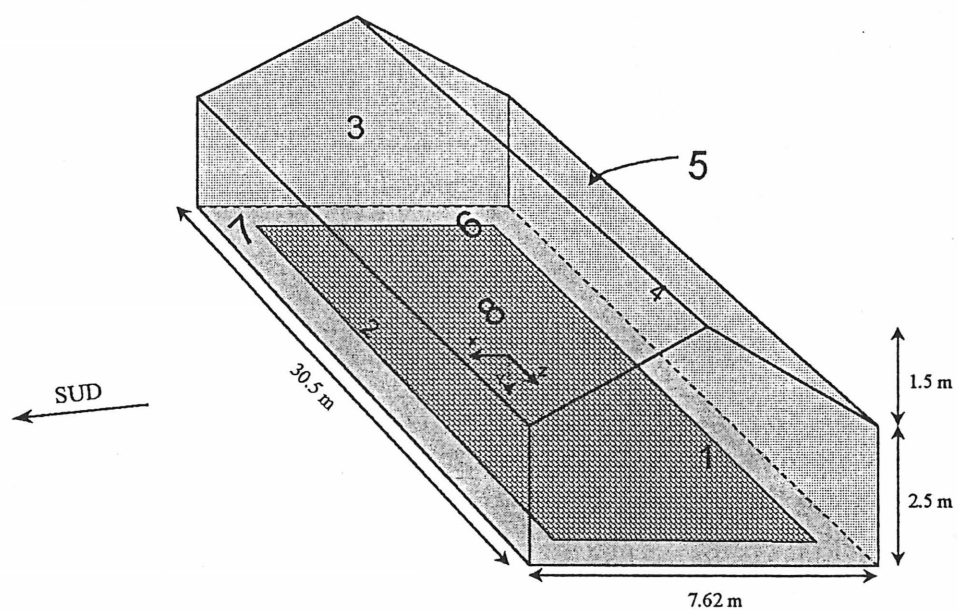
S3

Dimensions : Rez-de-chaussé : 30.5m X 7.62m X 2.5m

Entre-toit : 30.5m X 7.62m X 1.5m

Volume total :  $581 \text{ m}^3 + 174.3 \text{ m}^3 = 755.3 \text{ m}^3$

Schéma :



## **Caractéristiques générales:**

- Murs est(1), ouest(3) et nord(4) isolés
- Murs sud(2) et toit(5,6) recouvert de polyéthylène double
- Pas de salle de contrôle
- Personne dans la serre
- Pas de production de CO<sub>2</sub>
- Pas d'éclairage artificiel
- Pas de condensation
- Pas d'évaporation au sol
- Pas de toile thermique

## Calcul du Cap : Capacité calorifique totale du système

$$\text{Cap} = \text{Cap}_{\text{air}} + \text{Cap}_{\text{équip}} + \text{Cap}_{\text{plantes}}$$

$$\text{Cap}_{\text{air}} = \rho \text{ Cp Vtotal} = 882 \text{ kJ/}^\circ\text{C}$$

$$\text{Cap}_{\text{équip}} = (4 \text{ kJ/}^\circ\text{C}) / \text{m}^2 \text{ de serre} \times 232.4 \text{ m}^2 = 930 \text{ kJ/}^\circ\text{C}$$

$$\text{Cap}_{\text{plantes}} = (10 \text{ kJ/}^\circ\text{C}) / \text{m}^2 \text{ de serre} \times 232.4 \text{ m}^2 = 2300 \text{ kJ/}^\circ\text{C}$$

$$\text{Cap} \approx 4100 \text{ kJ / }^\circ\text{C}$$

[notes à Patrick Lemay]

## Coefficients de convection

### Interne :

Murs 1 à 6 :  $h_{ci} = 8.5 \text{ W/m}^2 \text{ K} = 30.6 \text{ kJ/h m}^2 \text{ K}$   $h_{ci}$  constant (paramètre de TRNSYS)

Plancher (7) :  $h_{csoi} = 7.7 \text{ W/m}^2 \text{ K} = 27.7 \text{ kJ/h m}^2 \text{ K}$

### Externe (fixé par TRNSYS):

Murs 1 à 6 :  $h_{co} = 5.7 + 3.8W \text{ (W/m}^2 \text{ K)}$

$W$  : Vitesse du vent (m/s)

### À la surface du sol (extérieur):

$$h_{csole} = 5.7 + 3.8W \text{ (W/m}^2 \text{ K)} = 3.6 * (5.7 + 3.8W) \text{ (kJ/h m}^2 \text{ K)}$$

### Références :

dans le mémoire de Patrick

### Mur de plantes (8) :

$$h_{c,feuille} = 4.7 \text{ W/m}^2 \text{ K} = 16.9 \text{ kJ/h m}^2 \text{ K}$$

$$h_{cpl} = (hp/hpmax) LAI_{max} h_{c,feuille}$$

$$hp = 1.5 \text{ m}$$

$$hpmax = 3.0 \text{ m}$$

$$LAI_{max} = 3 \text{ m}^2 \text{ de feuilles / m}^2 \text{ de plancher}$$

$$h_{cpl} = 25.4 \text{ kJ/h m}^2 \text{ K}$$

$h_{c,feuille}$  : Coefficient de convection à la surface des feuilles.

$h_{cpl}$  : Coefficient de convection apparent du mur de plantes.



## Calcul des coefficients d'infiltration

Pour calculer les coefficients d'infiltration (K1, K2 et K3) nous nous baserons sur les simulations effectuées par Patrick Lemay qui consistaient à reproduire les tests de déperditions thermiques nocturnes effectués par Hervé Bernier à La Pocatière. Les coefficients K1, K2 et K3 ont donc été ajustés de façon à ce que le modèle reproduise les mesures expérimentales.

Les coefficients trouvés pour la serre de La Pocatière sont :

$$K1_{Lapo} = 3.8 \text{ h}^{-1} \quad K2_{Lapo} = 0.017 \text{ h}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad K3_{Lapo} = 0.52 \text{ h}^{-1} (\text{m/s})^{-1}$$

Les coefficients K1, K2 et K3 dépendent du rapport entre la surface totale de la serre et son volume.

Pour la serre de La Pocatière :

$$S_{tot}/V_{tot} = 168.1 \text{ m}^2 / 222.46 \text{ m}^3 = 0.756 \text{ m}^{-1}$$

Pour la serre S1 :

$$S_{tot}/V_{tot} = 451.8 \text{ m}^2 / 755.3 \text{ m}^3 = 0.598 \text{ m}^{-1}$$

Nous allons considérer les coefficients K1, K2 et K3 proportionnels au rapport  $S_{tot}/V_{tot}$ . Les coefficients pour la serre S1 seront donc :

$$\begin{aligned} K1 &= (0.598 / 0.756) K1_{Lapo} & K1 &= 3.01 \text{ h}^{-1} \\ K2 &= (0.598 / 0.756) K2_{Lapo} & K2 &= 0.013 \text{ h}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \\ K3 &= (0.598 / 0.756) K3_{Lapo} & K3 &= 0.41 \text{ h}^{-1} (\text{m/s})^{-1} \end{aligned}$$

## Propriétés optiques

### Murs isolés (1), (3) et (4) :

Réfectivité de la surface interne :  $\rho_i = 0.72$  [Notes à Patrick]

Absorbivité de la surface externe :  $\alpha_i = 0.21$  [Notes à Patrick]

### Murs en double polyéthylène (2), (5) et (6) :

Transmissivité globale :  $\tau_i = 0.84$  [Const et equip. de serres]

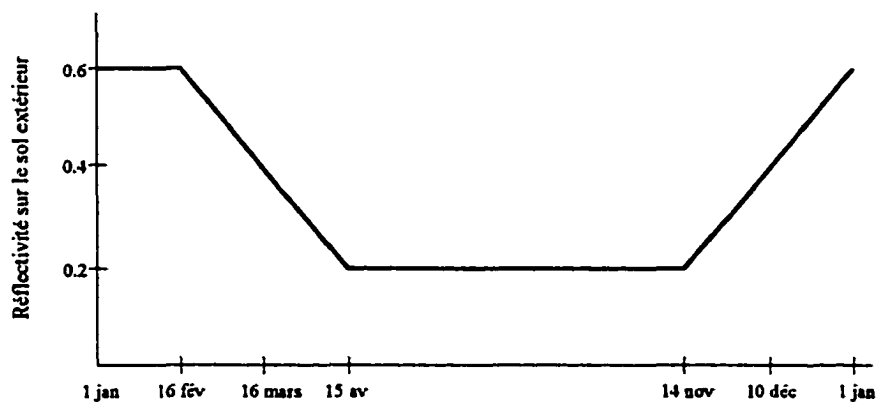
Transmissivité du rayonnement solaire diffu :  $\tau_i = 0.72$  [Notes à Patrick]

### Sol (7) :

Réfectivité :  $\rho_{\text{sol}} = 0.2$  [serreq7c.dat]

### Sol à l'extérieur de la serre :

Réfectivité:  $\rho_g$



Conserver la même réflectivité du sol à l'extérieur pour les trois sites au Québec (Sept-Iles, La Pocatière, Montréal).

### Mur de plantes (8) :

Absorbivité au rayonnement solaire de la feuille :  $\alpha_f = 0.14$

Absorbivité au rayonnement solaire apparente du mur de plantes :

$$\alpha_{\text{pl}} = (\text{hp}/\text{hp}_{\text{max}}) \text{LAI}_{\text{max}} \alpha_f \quad \alpha_{\text{pl}} = 0.21$$

Réfectivité apparente de la surface des plantes :  $\rho_{\text{pl}} = 0.79$

## Calcul de $fk_{ij}$

On considère que tout le rayonnement direct entrant dans la serre par les surfaces (2) et (6) frappe le sol (7) à 10% et le mur de plantes (8) à 90%. On considère aussi que le rayonnement solaire directe entrant par la surface (5) frappe les surfaces (4) à 50%, (7) à 5% et (8) à 45%.

$$Fk_{27} = 0.1 \quad Fk_{28} = 0.9$$

$$Fk_{54} = 0.5 \quad Fk_{57} = 0.05 \quad Fk_{58} = 0.45$$

$$Fk_{67} = 0.1 \quad Fk_{68} = 0.9$$

Note : la fraction du rayonnement direct frappant les surfaces (1) et (3) est relativement faible. De plus ce rayonnement est en grande partie rediffusé dans la serre, en particulier sur les surfaces (7) et (8).

## Calcul des $f_{ij}$

### Les aires des surfaces :

$$A1 = 19.05 + 5.715 = 24.77 \text{ m}^2$$

$$A2 = 76.25 \text{ m}^2$$

$$A3 = 19.05 + 5.715 = 24.77 \text{ m}^2$$

$$A4 = 76.25 \text{ m}^2$$

$$A5 = 124.89 \text{ m}^2$$

$$A6 = 124.89 \text{ m}^2$$

$$A7 = 323.4 \text{ m}^2$$

$$A8 = 291.06 \text{ m}^2 \quad (90\% \text{ de } A7)$$

### Les $f_{ij}$

Les  $f_{ij}$  sont calculés par TRNSYS ( geometry mode 0) en utilisant les rapports de surface:

$$f_{ij} = \frac{A_j}{\sum_{j=1}^7 A_j}$$

Cela constitue une approximation valable compte tenu des facteurs suivants:

- Toutes les surfaces sont considérées opaques aux infrarouges, le rayonnement est confinée dans la serre. Donc le bilan d'énergie radiatif n'en sera pas affecté.
- L'échange radiatif (loi de Stefan-Boltzman:  $E_b = \sigma T^4$ ) entre une surface à 15 °C et une surface à 23 °C (avec un facteur de forme mutuel de 0.5) est de l'ordre de 20 W/m<sup>2</sup>. Si l'on considère par exemple une erreur de 20% cela donne une erreur de 4W/m<sup>2</sup> sur l'échange radiatif. En guise de comparaison le besoin de chauffage d'un serre en hiver la nuit est d'environ 500 W/m<sup>2</sup>, ou encore les surplus de chaleur pendant le jour dans une serre l'été sont d'environ 350 W/m<sup>2</sup>.
- De plus la présence des plantes et de l'équipement rend impossible la connaissance des facteurs de forme avec précision.
- TRNSYS calcule des échanges radiatifs entre les surfaces 7 et 8. Ce qui n'est pas inexacte puisqu'il y a effectivement des échanges radiatifs entre le sol et les plantes.

## Propriétés thermiques des murs et fenêtres

### Murs (1), (3) et (4) (isolés) :

Parois en métal ondulé avec 76 mm d'isolant de polyuréthane

Les coefficients pour ces murs sont [Mémoire de Patrick]:

$N_b = 4$	$N_c = 4$	$N_d = 2$	
$b_0 = 0.4445$	$b_1 = 0.5134$	$b_2 = 0.0106$	$b_3 = 3 \times 10^{-7}$
$C_0 = 1.7778$	$C_1 = -0.81835$	$C_2 = 0.00916$	$C_3 = 1 \times 10^{-7}$
	$d_1 = -0.04853$	$d_2 = 1.2 \times 10^{-6}$	

### Fenêtres (2), (5) et (6)

Parois en polyéthylène double [Const. Et équip. De serres]:

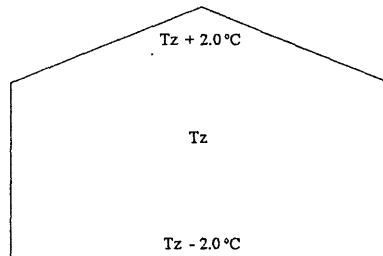
$$RSI = 0.25 \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

$$U_g = 4.0 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$U_g = 14.4 \text{ kJ/hr m}^2 \text{ K}$$

## Modélisation du gradient thermique dans la serre

### ➤ Au niveau des échanges thermiques avec l'extérieur



Nous ne tenons pas compte du gradient thermique directement dans la modélisation des fenêtres 5 et 6 (mode 1). On induit plutôt un rajustement via les gains internes ( $Q_{int}$ ).

Chaleur réelle entrant par les fenêtres (i) ou  $i=5$  ou 6

$$\dot{Q}_i = A_i U_{g,o,i} (T_a - (T_{eq,i} + 2.0))$$

$$\dot{Q}_i = A_i U_{g,o,i} (T_a - T_{eq,i}) - A_i U_{g,o,i} (2.0)$$

*TRNSYS*                      *Rajustement*

Le rajustement sera donc :

$$\dot{Q}_{at56} = -2.0(A_5 + A_6) \left( \frac{1}{U_g} + \frac{1}{h_{c,o}} + \frac{1}{h_{c,i}} \right)$$

### ➤ Au niveau des échanges thermiques avec la surface du sol

Contrairement au modèle S1 nous ne tiendrons pas compte dans le modèle S2 du gradient thermique au niveau de la convection à la surface du sol. Cela pouvait causer une inconsistance entre la température à la surface du sol vue par TRNSYS et celle vue par Biko. Même si l'erreur engendrée par ce problème n'était pas significative (puisque TRNSYS ne s'en sert que lors du calcul des échanges radiatifs infrarouges), cela peut cependant entraîner des problèmes de convergence.

### ➤ Au niveau du système de stockage souterrain

Le jour l'air à l'entrée des conduits provient du faîte de la serre et sa température sera donc :  $T_z + 2.0\text{ °C}$ .

La nuit l'air à l'entrée des conduits est recueilli au niveau du sol et sa température sera donc :  $T_z - 2.0\text{ °C}$ .

## Modélisation du mur de plantes (8)

La présence des plantes dans la serre est modélisée via l'insertion d'un mur à l'intérieur de la serre représentant les plantes. Ce mur (8) est suspendue au dessus du sol (7). L'air de sa surface est 90% celle de la surface totale du sol (7). Nous allons donc considérer que le sol et les plantes se partagent respectivement 10% et 90% du rayonnement solaire frappant le plancher (Voir calcul des  $f_{k,ij}$ ). TRNSYS ne sait pas que les surfaces 7 et 8 sont superposées. À la limite on pourrait supposer que le mur (8) est un grillage de la même dimension que le mur (7), et dont la surface des trous du grillage correspond à 10% de la surface (7).

La hauteur maximale ( $hp_{max}$ ) que les plantes peuvent atteindre de même que leur taux de croissance peuvent varier beaucoup d'une espèce à l'autre. En ce qui concerne les plants de tomates ou de concombres  $hp_{max} \approx 3.0$  m. C'est pourquoi nous adopterons une hauteur de plantes moyenne constante ( $hp$ ) de 1.5 m. Le rapport entre la surface totale d'un côté de toutes les feuilles et la surface de plantation (LAI : Leaf Area Index) est d'environ 3 m<sup>2</sup> de feuilles / m<sup>2</sup> de plancher pour des plants de tomates ou de concombres lorsqu'ils ont atteint leur maximum de croissance ( $LAI_{max}$ ).

$$hp = 1.5 \text{ m} \qquad hp_{max} = 3.0 \text{ m.} \qquad LAI_{max} = 3 \text{ m}^2 \text{ de feuilles / m}^2 \text{ de plancher}$$

### Évapotranspiration

Les plantes évacuent la chaleur qu'elles absorbent (principalement du rayonnement) par l'évapotranspiration, de façon à maintenir leur température à environ 0.75 °C en dessous de la température ambiante (dépendant de l'âge des feuilles). La chaleur transmise par le mur de plantes vers la serre est donnée par l'expression suivante :

$$Q_{pla2s} = A8 \cdot hc_{pl} \cdot (T_z - 0.75) - T_{eq8}$$

$Q_{pla2s}$  sera fournis comme entrée du type 19

( $T_z - 0.75$ ) est la température des plantes imposée

Le taux d'évaporation du mur de plantes sera donc

$$M_{evap} = \text{MAX}(-Q_{pla2s}, 0) / h_{evap} + M_{evcte}$$

$$\text{Avec } h_{evap} = 2454 \text{ kJ/kg eau}$$

Le gain d'humidité  $M_{evap}$  est ajouté au gain d'humidité du type 19 ( $wI = \dots + M_{evap} + \dots$ ).

Nous considérons une évapotranspiration constante correspondant au terme  $M_{evcte}$ . Lorsque  $Q_{pla2s}$  devient positif (la nuit) les plantes ont un taux d'évapotranspiration de  $M_{evcte}$ .

Nous considérons une évapotranspiration constante correspondant environ à 5% de l'évapotranspiration pendant les journées ensoleillées. Pour la serre de La Pocatière cela équivaut environ à 1 kg/h, d'où un taux d'évapotranspiration moyen de  $1.25 \times 10^{-2}$  kg/m<sup>2</sup> h. Le taux d'évapotranspiration constant pour la serre S2 sera donc,

$$M_{evcte} = 4.0 \text{ kg/h}$$

L'énergie nécessaire à l'évaporation de cette eau doit être enlevée de la serre via les gains internes. Le terme suivant sera donc ajouté au gain interne dans la serre :

$$Q_{int} = \dots + \dots - M_{evcte} h_{evap}$$

L'eau évaporée équivaut à la quantité d'eau d'arrosage qui provient généralement d'un puit dont la température est de l'ordre de 4 °C. Cette eau doit être préalablement chauffée à la température de la serre. Nous devons donc ajouter au terme d'énergie interne le terme suivant :

$$Q_{int} = \dots + \dots - M_{evap} C_{p_{eau}} (T_z - 4.0)$$

Où  $C_{p_{eau}} = 4.2 \text{ kJ/kg K}$

Référence : Mémoire de Patrick Lemay



## **Condensation sur le fenêtrage et évaporation à la surface du sol**

D'après les résultats de simulations effectuées sur la serre de La Pocatière par Patrick Lemay, le taux de condensation sur le fenêtrage varie autour de 1 kg/h (0 à 2 kg/h) et le taux d'évaporation au sol varie entre 2 et 5 kg /h. L'évapotranspiration des plantes à mi-croissance représentait environ 15 kg/h.

**Nous ne tiendrons pas compte de la condensation sur le fenêtrage ni de l'évaporation à la surface du sol pour les raisons suivantes :**

- **Il est difficile d'évaluer ces quantités avec précision.**
- **Ces deux phénomènes sont du même ordre de grandeur et ont des effets opposés sur le bilan d'humidité dans la serre.**
- **Le fait que nous ayons choisis de considérer les plantes à une hauteur constante correspondant à la mi-croissance, constitue déjà une approximation qui, même si elle nous permet de représenter une culture moyenne, comprend une incertitude du même ordre de grandeur que les valeurs combinées de la condensation sur le fenêtrage, et de l'évaporation à la surface du sol.**

***Nous ne tenons pas compte des faibles changements de propriétés engendrés par la condensation sur le fenêtrage.***

## Ventilation des surplus d'humidité et de la surchauffe

Nous imposons une ventilation forcée lorsque l'humidité relative dans la serre atteint 80%. La ventilation s'arrête lorsque l'humidité est redescendue à 70%.

Nous allons considérer que les ventilateurs du surplus d'humidité sont en mesure d'effectuer environ un quart de changement d'air de la serre par minute.

Débit des ventilateurs de surplus d'humidité : 189 m<sup>3</sup>/min 11300 m<sup>3</sup>/h

$$mv = (11300 \text{ m}^3/\text{h}) (1.16 \text{ kg/m}^3)$$

$$mv \approx \dots + \dots + 13000 \text{ kg/h}$$

## Température de confort des plantes et température maximum

$$T_{\text{jour}} = 24.0$$

$$T_{\text{nuit}} = 14.0$$

$$T_{\text{max}} = 28.0$$

Les ventilateurs de surchauffe démarrent lorsque la température de la serre dépasse **T<sub>maxH</sub>** et s'arrêtent lorsque la température redescend à **T<sub>maxL</sub>**. Pour la serre S2 ces valeurs ont été fixées à :

$$T_{\text{maxH}} = T_{\text{max}}$$

$$T_{\text{maxL}} = T_{\text{max}} - 2.0$$

Nous allons considérer que les ventilateurs de surchauffe sont en mesure d'effectuer environ un changements d'air de la serre par minute.

$$mv \approx \dots + \dots + 52000 \text{ kg/h}$$

La température de ventilation correspond à la température extérieure. L'humidité de ventilation correspond à l'humidité extérieure. La ventilation est insérée dans le modèle via les entrées 3,4 et 5 du type 19.

## Chauffage

Le système de chauffage sert à maintenir la température de la serre entre **T<sub>nuitL</sub>** et **T<sub>nuitH</sub>** la nuit, et entre **T<sub>jourL</sub>** et **T<sub>jourH</sub>** la jour. Pour la serre S2 ces valeurs ont été fixées à :

$$T_{\text{nuitL}} = T_{\text{nuit}} - 1.0$$

$$T_{\text{nuitH}} = T_{\text{nuit}} + 1.0$$

$$T_{\text{jourL}} = T_{\text{jour}} - 1.0$$

$$T_{\text{jourH}} = T_{\text{jour}} + 1.0$$

La capacité du système de chauffage a été déterminée à partir des besoins de chauffage annuels dans une serre située dans la région de Québec, et dans laquelle la température est maintenue à 15°C la nuit et à 26 °C le jour [Const. Et équip. De serre p.5.31].

Consommation annuelle de combustible (huile No 2): 90 litres/m<sup>2</sup> de serre

Consommation annuelle d'énergie :

**(90 litres/m<sup>2</sup> de serre) (38850 kJ/litre) = 3.5X10<sup>6</sup> kJ/m<sup>2</sup> de serre**

**Consommation horaire moyenne pour la serre S3 : 1.29X10<sup>5</sup> kJ/h**

**Nous considérons la capacité du système de chauffage à 5 fois la consommation horaire moyenne, soit :**

**Capacité du système de chauffage 6.5X10<sup>5</sup> kJ/h**

## Système de stockage ECHAS

### Température à l'entrée du système de stockage souterrain

Le jour l'air à l'entrée des conduits provient du faite de la serre et sa température sera donc :

$$T_{inc} = T_z + 2.0 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

La nuit l'air à l'entrée des conduits est recueilli au niveau du sol et sa température sera donc :

$$T_{inc} = T_z - 2.0 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

### Fonctionnement du système de stockage

Le système de stockage fonctionne en mode recirculation seulement. Il est indépendant des systèmes de ventilation du surplus d'humidité et de surchauffe.

Deux paramètres sont utilisés pour contrôler le système de stockage, la température dans la serre ( $T_z$ ) et la différence de température entre la serre et le sol entre les conduits ( $dT_{zsol} = T_z - T_{sol}$ ). La température  $T_{sol}$  correspond à la température moyenne sur une ligne le long des conduits située au centre de quatre conduits. Cette température est obtenue en simulant une interface entre Biko et TRNSYS via un flux de chaleur (ajusté à zéro par TRNSYS) à la paroi adiabatique à une profondeur de 630 mm. Ce flux de chaleur n'a pas d'influence sur le champ de température, cependant Biko retourne à TRNSYS la température moyenne de la surface où le flux de chaleur est imposé.

Le jour le système de stockage ne doit jamais fonctionner en même temps que le système de chauffage. Lorsque le système fonctionne la vitesse d'écoulement dans les conduits  $V_c = 4.0$  et dans le cas contraire  $V_c = 0.0$ .

#### Le jour

Démarre si :  $T_z > T_{jechH} = T_{jour} + 2.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$  et  $dT_{zsol} > 2.0$

S'arrête si :  $T_z < T_{jechL} = T_{jour} - 1.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ou  $dT_{zsol} < 0.0$

#### La nuit

Démarre si :  $T_z < T_{nechL} = T_{nuit}$  et  $dT_{zsol} < -2.0$

S'arrête si :  $T_z > T_{nechH} = T_{nuit} + 1.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ou  $dT_{zsol} > 0$

### Fonctionnement du système de chauffage

$$T_{nuitL} = T_{nuit} - 1.0$$

$$T_{nuitH} = T_{nuit} + 1.0$$

$$T_{jourL} = T_{jour} - 1.0$$

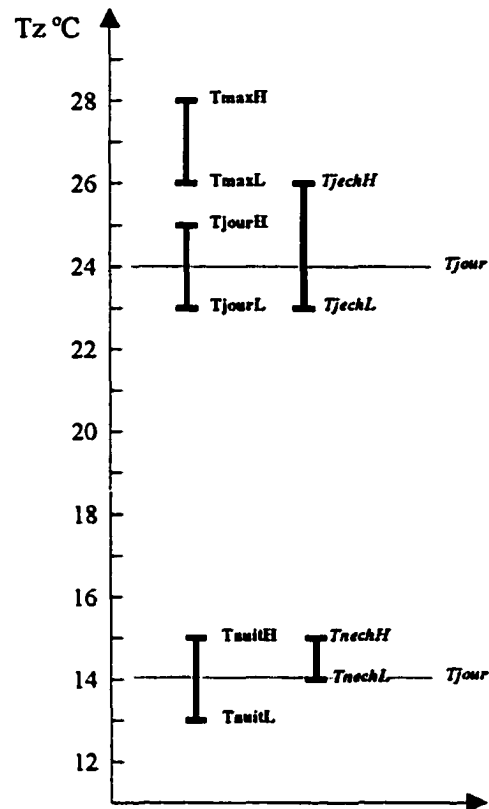
$$T_{jourH} = T_{jour} + 1.0$$

### Fonctionnement de la ventilation de surchauffe

$$T_{maxL} = T_{max} - 2.0$$

$$T_{maxH} = T_{max}$$

## Représentation graphique du fonctionnement des systèmes de stockage, de ventilation et de chauffage



### Consommation d'énergie des moteurs du système de stockage

La consommation d'énergie des moteurs sera 4 fois celle de La Pocatière : **3000 Watts**

L'énergie électrique consommée par les moteurs est entièrement transformée en chaleur : 1) directement produite par les moteurs; 2) produite par la viscosité de l'air lorsque l'écoulement meurt dans la serre. Il faut donc ajouter la consommation d'énergie électrique des moteurs au bilan d'énergie dans la serre via les gains de chaleur internes.

$$Q_{motv} = 3 \text{ kJ/s} = 10800 \text{ kJ/h}$$

si système en fonction

$$Q_{int} = \dots + \dots + Q_{motv} + \dots$$

## **ANNEXE B:**

**Fichier d'entrée pour une simulation typique serre+sol+ÉCHAS**

ASSIGN ECRAN.OUT 6

Projet ECHAS

Modele de serre standard : S2

Systeme de stockage: E0 (sol seul)

Climats : Montreal (C3)

Fichier d'entrees pour TRNSYS

Comme S2E0C3 mais avec (Tnuit=18, Tjour=22)

TnuitL = 17.0

TnuitH = 19.0

TjourL = 21.0

TjourH = 23.0

Definition des variables

Alou3, A2ou4, A5ou6, A7, A8 Air des surfaces 1 a 8 (m2)

Cap Capacite thermique globale de la serre avec l'equipement qu'elle contient (kJ / K)

Cpeau Capacite calorifique de l'eau (=4.2 kJ/kg K)

delt Pas de temps (heure)

hci Coefficient de convection interne des murs 1 a 6 (kJ/(m2 h K))

hco Coefficient de convection externe des murs 1 a 6 (kJ/(m2 h K))

hcsoli Coefficient de convection du sol interieur (mur 7) (kJ/(m2 h K))

hcpl Coefficient de convection apparent du mur de plantes (mur 8) (kJ/(m2 h K))

hsole Coefficient de convection du sol exterieur (kJ/(m2 h K))

heure Heure du jour a t=time dans la simulation

hevap Chaleur d'evaporation de l'eau (2454 kJ/kg d'eau a 20 Cel).

I Rayonnement solaire total sur une surface horizontale (kJ/(m2 h))

Idiff Rayonnement solaire diffu sur une surface horizontale (kJ/(m2 h))

IT1, IT2, IT3, IT4, IT5, IT6 Rayonnement solaire totale reçu par les surfaces 1 a 6.

Itb2, Itb5, Itb6 Rayonnement solaire direct reçu par les surfaces 2, 5 et 6.

jour Jour a t=time dans la simulation

K1 Changement d'air constant par heure (infiltrations)

K2 Constante de proportionalite entre le changement d'air et la difference de temperature entre l'interieur et l'exterieur de la serre (infiltrations).

K3 Constante de proportionalite entre le changement d'air et la vitesse du vent (infiltrations).

latit Latitude du site en degres

mois Mois a t=time dans la simulation

Mevap Gain d'humidite dans la serre du a l'evapotranspiration des plantes (kg/h).

Mevcte Gain d'humidite dans la serre du a l'evapotranspiration constante des plantes (kg/h).

mv Debit de masse de la ventilation (kg/h).

Nj Nombre de jours dans la simulation =(tfinal-tinit)/24.

Nh Nombre d'heures dans la simulation =tfinal - tinit.

qe2sol Flux de chaleur moyen entrant dans le sol par la surface a l'exterieur de la serre (W/m2)

qs2sol Flux de chaleur moyen entrant dans le sol par la surface 7

Qc16 Energie entrant dans la serre par convection par les surfaces 1 a 6 (kJ/h).

Qc7 Energie entrant dans la serre par convection par la surface 7 (kJ/h).

QintdT Rajustement du taux de transfert de chaleur entrant dans la serre du au gradient thermique (kJ/h).

QintMC Taux de transfert de chaleur entrant dans la serre du au rechauffement de l'eau d'arrosage (kJ/h).

QintMe Taux de transfert de chaleur entrant dans la serre du a l'evapotranspiration constante des plantes (kJ/h).

Qintch Taux de transfert de chaleur entrant dans la serre du au chauffage (kJ/h).

Qpla2s Taux de transfert de chaleur entrant dans la serre par la surface 8 (plantes) (kJ/h). Qpla2s est une entree du type 19.

Qsol2s Taux de transfert de chaleur entrant dans la serre par la surface 7 (kJ/h). Qsol2s est une entree du type 19.

RH Humidite relative a l'exterieur

RHz Humidite relative dans la serre

S7, S8 Gain radiatif absorbé par les surfaces 7 et 8 provenant du soleil, de l'M-éclairage et des personnes dans la serre (kJ/h).

shft Decalage par rapport au meridian standard du fuseau horaire (E.S.T.)

startd Jour de l'annee correspondant au debut de la simulation

Ta Temperature exterieure (degre Celcius)

Tainit Temperature exterieure initiale (degre Celcius)

T0 Temperature initiale dans la serre (degre Celcius)

TnuitL Temperature de demarrage du systeme de chauffage la nuit

TnuitH Temperature d'arret du systeme de chauffage la nuit

TjourL Temperature de demarrage du systeme de chauffage le jour

TjourH Temperature d'arret du systeme de chauffage le jour

TmaxL Temperature d'arret de la ventilation de surchauffe

TmaxH Temperature de demarrage de la ventilation de surchauffe

RHzL Humidite relative d'arret de la ventilation de l'humidite

RHzH Humidite relative de demarrage de la ventilation de l'humidite

Teq7 Temperature equivalente de la serre vue par la surface 7 (degre C)

Teq8 Temperature equivalente de la serre vue par la surface 8 (degre C)

Ts7 Temperature de la surface 7 (degre C)

Tse Temperature du sol a l'exterieur (degre C)

Tz Temperature dans la serre (zone) (degre C)

Tzinit Temperature initiale dans la serre (degre Celcius)

tinit Temps initial de la simulation (heure)

tfinal Temps final de la simulation (heure)

Ug256 Coefficient de perte de chaleur des parois 2,5 et 6 (kJ/(m2 h K)) N'inclu pas la convection aux surfaces des parois.

Nb, Nc, Nd, b0, b1, b2, b3 Coefficients pour la fonction de transfert des murs 1, 3 et 4.

CO, C1, C2, C3, d1, d2 des murs 1, 3 et 4.

Vtotal Volume total de la serre (m3)

wa Humidite absolue a l'exterieur (kg vapeur / kg air sec)

wainit Humidite absolue initiale a l'exterieur

w0 Humidite absolue initiale dans la serre (kg vapeur / kg air sec)

wz Humidite absolue dans la serre (kg vapeur / kg air sec)

W Vitesse du vent (m/s)

all34 Absorbivite de la surface externe des murs isolés (1,3,4)

rhopl Reflectivite apparente du mur de plantes (8)

rhosi Reflectivite du sol (interieur de la serre)

rho134 Reflectivite de la surface interne des murs isolés (1,3,4)

rhog Reflectivite du sol a l'exterieur de la serre

th256 Transmissivite globale des surfaces 2,5 et 6

thd256 Transmissivite du ray solaire diffu des surfaces 2,5 et 6

FICHIERS D'ENTREES

\*\*\*\*\*

-----  
 \* Donnees climatiques

ASSIGN ../CLIMATS/MTL.CLI 40

-----  
 \* Systeme de stockage ECHAS

ASSIGN E0.BIK 75

\*\*\*\*\*

\* FICHIERS DE SORTIES DE RESULTATS

\*\*\*\*\*

-----  
 \* Resultats

ASSIGN S2E0C3b.REH 55  
 ASSIGN S2E0C3b.REJ 56  
 ASSIGN S2E0C3b.REM 57  
 ASSIGN S2E0C3b.TES 58

\*\*\*\*\*

\* PARAMETRES DE RESOLUTION

\*\*\*\*\*

EQUATIONS 4  
 tinit = 0.0  
 tfinal = 8760  
 delt = 0.016666  
 startd = 1

SIMULATION tinit tfinal delt

TOLERANCES 0.01 0.01

LIMITS 200 200

\*\*\*\*\*

\* EQUATIONS

\*\*\*\*\*

-----  
 \* Parametres dependant du site

	Sept-Iles(C1)	La Pocatiere(C2)	Montreal(C3)
latit	50.2	47.35	45.5
shft	7.4	5.0	1.3
Tainit	-28.0	-26.0	-24.4
wainit	0.0002	0.0002	0.0002

EQUATIONS 4  
 latit = 45.5  
 shft = 1.3  
 Tainit = -24.4  
 wainit = 0.0002

-----

\* Temperature et humidite dans la serre  
 (+ conditions initiales)

EQUATIONS 4  
 Tz = [19.1]  
 wz = [19.2]  
 T0 = 13.0

w0 = 0.008

-----  
 \* Air des surfaces de la serre et volume total

EQUATIONS 6  
 Alou3 = 24.77  
 A2ou4 = 76.25  
 A5ou6 = 124.89  
 A7 = 323.4  
 A8 = 291.06  
 Vtotal = 755.3

-----  
 \* proprietes de l'eau

EQUATIONS 2  
 Cpeau = 4.2  
 hevap = 2454.0

-----  
 \* Capacite thermique globale de la serre avec ce qu'elle contient

EQUATIONS 1  
 Cap = 4100.0

-----  
 \* Donnees climatiques

EQUATIONS 9  
 mois = [9.2]  
 jour = [9.3]  
 heure = [9.4]  
 Ta = [9.5]  
 RH = [9.6]  
 wa = [9.7]  
 W = [9.8]  
 I = [9.9]  
 Idiff = MIN([9.10], I\*0.9999)

-----  
 \* Variables servant aux calculs de rayonnement solaire

EQUATIONS 9  
 IT1=[16.6]  
 IT2=[16.11]  
 IT3=[16.14]  
 IT4=[17.6]  
 IT5=[17.11]  
 IT6=[17.14]  
 ITb2=[16.12]  
 ITb5=[17.12]  
 ITb6=[17.15]

-----  
 \* Les coefficients de convection (kJ/m2 h K)

EQUATIONS 5  
 hci = 30.6  
 hco = 3.6\*(5.7 + 3.8\*W)  
 hcsoli = 27.7  
 hcpl = 25.4  
 hcsle = 3.6\*(5.7 + 3.8\*W)

-----  
 \* Les proprietes optiques

EQUATIONS 7  
 al134 = 0.21  
 rhosi = 0.2  
 rhopl = 0.79  
 rho134 = 0.72  
 th256 = 0.84



thd256 = 0.72  
rhog = [60,1]

-----  
\* Coefficients de perte de chaleur

EQUATIONS 14  
Ug256 = 14.4  
Nb = 4  
Nc = 4  
Nd = 2  
b0 = 0.4445  
b1 = 0.5134  
b2 = 0.0106  
b3 = 3E-7  
C0 = 1.7778  
C1 = -0.81835  
C2 = 0.00916  
C3 = 1E-7  
d1 = -0.04853  
d2 = 1.2E-6

-----  
\* Les infiltrations d'air

EQUATIONS 3  
K1 = 3.01  
K2 = 0.013  
K3 = 0.41

-----  
\* Limites de temperature et d'humidite dans la serre

EQUATIONS 8  
TnuitL = 17.0  
TnuitH = 19.0  
TjourL = 21.0  
TjourH = 23.0  
TmaxL = 26.0  
TmaxH = 28.0  
RHZL = 70.0  
RHZH = 80.0

-----  
\* Calcul des echanges entre Biko et TRNSYS

EQUATIONS 6  
Ts7 = [75,1]  
\*\*\*\*\* Important: la temperature Ts7 doit provenir de Biko \*\*\*\*\*  
Tse = [75,2]  
Teq7 = [19,12]  
qs2sol = - hcsoli\*(Ts7-Teq7) / 3.6  
Qsol2s = A7\*hcsoli\*(Ts7-Teq7)  
qe2sol = ( (1-rhog)\*I + hcsoli\*(Ta-Tse) ) / 3.6

-----  
\* Calcul des echanges avec le mur de plantes

EQUATIONS 5  
Teq8 = [19,15]  
Qpla2s = A8\*hcpl\*(Tz-0.75) - Teq8)  
Mevcte = 4.0  
Mevap = MAX(-Qpla2s,0) / hevap + Mevcte  
QintMe = -Mevcte\*hevap

-----  
\* Modelisation du gradient thermique dans la serre On considere la  
\* temperature de l'air dans le faite de la serre 2 degres superieure  
\* a la temperature moyenne dans la serre. Il faut donc rajuster les  
\* echanges thermiques avec l'exterieur via les gains de chaleur internes.

EQUATIONS 1  
QintDT = -2.0\*(A5ou6 + A5ou6)/(1.0/Ug256 + 1.0/hco + 1.0/hci)

-----  
\* Calcul des pertes de chaleur dues au chauffage de l'eau d'arrosage

EQUATIONS 1  
QintMC = -Mevap\*Cpeau\*(Tz-4.0)

-----  
\*  
\* VENTILATION  
\*  
\*-----

-----  
\* Les ventilateurs du surplus d'humidite demarrent lorsque l'humidite  
\* dans la serre atteint RHZH et ils s'arretent lorsque l'humidite  
\* dans la serre atteint RHZL.  
\* Les ventilateurs de surchauffe demarrent lorsque la temperature de  
\* la serre atteint TmaxH et s'arretent lorsque la temprature est  
\* redescendue en bas de TmaxL.  
\* Les ventilateurs de surplus d'humidite peuvent effectuer un demi  
\* changement d'air de la serre par minute (~13000 kg/h).  
\* Les ventilateurs de surchauffe peuvent effectuer trois  
\* changements d'air de la serre par minute (~52000 kg/h).

UNIT 33 TYPE 33 Psychrometrics (RHZ)

PARAMETERS 5  
4 1 1 0 1  
INPUTS 2  
Tz wZ  
T0 w0

EQUATIONS 1  
RHZ = [33,6]

UNIT 34 TYPE 2 Controleur (ventilation de l'humidite)

PARAMETERS 3  
1 RHZH RHZL  
INPUTS 3  
RHZ 0.0 34.1  
T0 0.0 0

UNIT 35 TYPE 2 Controleur (ventilation de la surchauffe)

PARAMETERS 3  
1 TmaxH TmaxL  
INPUTS 3  
Tz 0.0 35.1  
13.0 0.0 0

EQUATIONS 1  
mv = [34,1]\*13000.0 + [35,1]\*52000.0

-----  
\*  
\* CHAUFFAGE  
\*  
\*-----

-----  
\* Le chauffage a deux modes de fonctionnement  
\* La nuit: Demarre si Tz < TnuitL et arrete si Tz > TnuitH  
\* Le jour: Demarre si Tz < TjourL et arrete si Tz > TjourH  
\* Le systeme de chauffage fournit 6.5e5 kJ/h (2000 kJ/m2 h)

UNIT 36 TYPE 2 Controleur du systeme de chauffage la nuit

PARAMETERS 3  
1 TnuitH TnuitL  
INPUTS 3  
Tz 0.0 36.1  
13.0 0.0 0

UNIT 37 TYPE 2 Controleur du systeme de chauffage le jour

PARAMETERS 3

1 TjourH TjourL

INPUTS 3

Tz 0,0 37,1

13,0 0,0 0

EQUATIONS 3

chnuit = OR(LT(heure,8,00),GT(heure,19,99))\*(1,0-[36,1])\*6.5e5

chjour = AND(LT(heure,20),GT(heure,8))\*(1,0-[37,1])\*6.5e5

Qintch = chnuit + chjour

\*\*\*\*\*

SOMME DES GAINS DE CHALEUR INTERNES

\*\*\*\*\*

EQUATIONS 1

Qint = QintDT + QintMC + QintMe + Qintch

\*\*\*\*\*

IMPOSITION DE PROFILS DE VALEURS EN FONCTION DU TEMPS  
POUR CERTAINES VARIABLES (time forcing functions)

\*\*\*\*\*

Reflectivite du sol a l'exterieur de la serre

UNIT 60 TYPE 14 time forcing function

PARAMETERS 14

0 0,6 1105 0,6 1777 0,4 2497 0,2 7609 0,2 8233 0,4 8760 0,6  
1jan 16fev 16mar 15avl 14nov 10dec 1jan

\*\*\*\*\*

LECTURE DES DONNEES CLIMATIQUES

\*\*\*\*\*

UNIT 9 TYPE 9 Data reader

PARAMETERS 33

10 1 1 1 0 -2 1 0 -3 1 0 -4 1 0 5 1 0  
time mois jour heure Ta

6 1 0 7 1 0 8 1 0 -9 1 0 -10 1 0 40  
RH wa W I Idiff Unlte de lecture

\*\*\*\*\*

RAYONNEMENT SOLAIRE

\*\*\*\*\*

UNIT 16 TYPE 16 Solar Radiation Processor (surf 1,2,3)

PARAMETERS 8

8 1 3 startd latit 4871 shift -1

INPUTS 5

I Idiff 9,19 9,20 rhog

0 0 0 0 0,6

INPUTS 6

0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0

90 -90 90 0,0 90 90

Surf1 surf2 surf3

UNIT 17 TYPE 16 Solar Radiation Processor (surf 4,5,6)

PARAMETERS 8

8 1 3 startd latit 4871 shift -1

INPUTS 5

I Idiff 9,19 9,20 rhog  
0 0 0 0 0,6

INPUTS 6

0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0

90 180 37,5 180 37,5 0,0

surf4 surf5 surf6

\*\*\*\*\*

DEFINITION DE LA SERRE (type 19)

\*\*\*\*\*

UNIT 19 TYPE 19 Detailed zone (la serre)

Parametres generaux

PARAMETERS 8

2 1 Vtotal K1 K2 K3 Cap 8

PARAMETERS 2

T0 w0

Entrees generales

INPUTS 11

Ta wa Ta mv wa Mevap 0,0 0,0 0,0 0,0 Qint W  
Tainit wainit Tainit 0,0 wainit 0,0 0 5 0,0 0,0 8,0

Mur 1 (mur ASHRAE isole)

PARAMETERS 20

1 1 A1ou3 rho134 al134 4

hci Nb Nc Nd

b0 b1 b2 b3

C0 C1 C2 C3

d1 d2

INPUTS 1

IT1

0,0

Mur 3 (mur ASHRAE isole)

PARAMETERS 20

3 1 A1ou3 rho134 al134 4

hci Nb Nc Nd

b0 b1 b2 b3

C0 C1 C2 C3

d1 d2

INPUTS 1

IT3

0,0

Mur 4 (mur ASHRAE isole)

PARAMETERS 20

4 1 A2ou4 rho134 al134 4

hci Nb Nc Nd

b0 b1 b2 b3

C0 C1 C2 C3

d1 d2

INPUTS 1

IT4

0,0

Mur 2 (fenetre du rez-de-chausse sud)

```

PARAMETERS 9
2 5 A2ou4 1 thd256 hci 2 7 8
INPUTS 6
IT2 ITb2 0,0 0,0 0,0 0,0
0,0 0,0 th256 Ug256 0,1 0,9

```

• Mur 5 (Fenetre du toit nord)

```

PARAMETERS 10
5 5 A5ou6 1 thd256 hci 3 4 7 8
INPUTS 7
IT5 ITb5 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0
0,0 0,0 th256 Ug256 0,5 0,05 0,45

```

• Mur 6 (Fenetre du toit sud)

```

PARAMETERS 9
6 5 A5ou6 1 thd256 hci 2 7 8
INPUTS 6
IT6 ITb6 0,0 0,0 0,0 0,0
0,0 0,0 th256 Ug256 0,1 0,9

```

• Mur 7 Sol - Echange avec Biko (non-ashrae wall)

```

PARAMETERS 5
7 4 A7 rhosi hcsoli
INPUTS 1
Qsol2s
0,0

```

• Mur 8 Mur de plantes (non-ashrae wall)

```

PARAMETERS 5
8 4 A8 rhopl hcpl
INPUTS 1
Qpla2s
0,0

```

• Facteurs de forme (Area ratios parameters)

```

PARAMETERS 1
0

```

• Sorties optionnelles de l'UNIT 19

```

PARAMETERS 13
6
1 7 2 7 3 7 1 8 2 8 3 8

```

DEFINITION DU SYSTEME DE STOCKAGE ; Sol seul (E0)

```

UNIT 75 TYPE 75
PARAMETERS 1
75
INPUTS 2
qs2sol qe2sol
0,0 0,0

```

SORTIE DES RESULTATS EN FORMAT TECPLOT

• Les sorties aux heures

EQUATIONS 6

Qc7 = A7\*hcsoli\*(Ts7-Tz)  
 • La sortie {19,3} n'inclu pas l'effet du gradient thermique  
 • d'où le terme QintdT dans l'expression suivante  
 $Qc16 = \{19,3\} - Qc7 + QintdT$   
 $S7 = \{19,13\}$   
 $S8 = \{19,16\}$   
 $Nh = t_{final} - t_{init}$   
 $bidon = 0.0$

UNIT 55 TYPE 55 Sorties aux heures

```

PARAMETERS 2
55 Nh
INPUTS 8
mois jour heure Ta RH W I Idiff
0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0
INPUTS 7
Tz wz Qc16 19,5 19,6 bidon bidon
0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0
INPUTS 7
Ts7 S7 Qc7 RHZ S8 Mevap Qintch
0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0

```

• Les sorties aux jours (integrees sur une journee)

EQUATIONS 10

$Qc16p = ABS(Qc16)*GT(Qc16,0)$   
 $Qc16n = ABS(Qc16)*GT(0,Qc16)$   
 $Qinf p = ABS(\{19,5\})*GT(\{19,5\},0)$   
 $Qinf n = ABS(\{19,5\})*GT(0,\{19,5\})$   
 $Qvp = ABS(\{19,6\})*GT(\{19,6\},0)$   
 $Qvn = ABS(\{19,6\})*GT(0,\{19,6\})$   
 $Qc7p = ABS(Qc7)*GT(Qc7,0)$   
 $Qc7n = ABS(Qc7)*GT(0,Qc7)$   
 $IT256 = A2ou4*IT2 + A5ou6*IT5 + A5ou6*IT6$   
 $Nj = (t_{final} - t_{init})/24.0$

UNIT 24 TYPE 24 Integrateur sur une journee

```

PARAMETERS 1
24.0
INPUTS 10
Qc16p Qc16n Qinf p Qinf n Qvp Qvn bidon bidon bidon bidon
0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0

```

UNIT 25 TYPE 24 Integrateur sur une journee

```

PARAMETERS 1
24.0
INPUTS 7
Qc7p Qc7n S7 IT256 S8 Mevap Qintch
0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0

```

UNIT 56 TYPE 55 Sorties aux jours format tecplot

```

PARAMETERS 2
56 Nh
INPUTS 10
24,1 24,2 24,3 24,4 24,5 24,6 24,7 24,8 24,9 24,10
0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0
INPUTS 7
25,1 25,2 25,3 25,4 25,5 25,6 25,7
0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0

```

• Sorties aux mois (Integrees sur un mois)

[illegible]

Projet ECHAS

Modele de systeme de stockage: E1

Fichier d'entrees pour Biko (type 75)

Sortie des rM-isultats

SORTIE\_MAIILLAGE  
E1.grid

SORTIE\_PROPRIETES  
E1.prop

SORTIE\_TEMPERATURES  
E1.T  
10

SORTIE\_CONDUITS\_EVOLUTION  
E1.Mr  
E1.cT  
E1.OME  
E1.dP  
8760

SORTIE\_TEMPERATURES\_LOCALES  
E1.Tloc  
8760  
2  
18 22 5  
11 17 5

Sortie du champ de temperature final binaire  
pour (LMAX=40, HMAX=60, NMAX=20)

SORTIE\_TEMP\_FINALE\_BIN  
E1.bin

Temperature initiale

ENTREE\_TEMP\_INITIALE\_BIN  
E1.bin

ZONE_TEMPERATURE_INITIALE					
1	18	1	54	1	10
20.0					
0.0	0.0				
-12.0	0.0				
0.0	0.0				

Creation du maillage

MAILLAGE_x				
7	0.0	0.1335	0.01907	
MAILLAGE_x				
4	0.1335	0.2295	0.024	
MAILLAGE_x				
7	0.2295	0.363	0.01907	

MAILLAGE_y				
12	0.0	0.4	0.04	

MAILLAGE_y			
4	0.4	0.496	0.024
MAILLAGE_y			
12	0.496	0.763	0.0223
MAILLAGE_y			
4	0.763	0.859	0.024
MAILLAGE_y			
10	0.859	1.3	0.024
MAILLAGE_y			
5	1.3	1.376	0.0152
MAILLAGE_y			
7	1.376	3.0	0.1

MAILLAGE_z			
10	0.0	14.5	1.45

Les concentrations hydriques

ZONE_HUMIDITE					
1	18	1	42	1	10
0.2					
0.0	0.0				
0.2	0.0				
0.0	0.0				

ZONE_HUMIDITE					
1	18	43	54	1	10
0.4					
0.0	0.0				
0.05	0.0				
0.0	0.0				

Les proprietes du milieu

SOL S1					
-----					
ZONE_PROPRIETES					
1	18	1	12	1	10
0.7		1.4			
8.19e5	4.2e6				

SOL S2					
-----					
ZONE_PROPRIETES					
1	18	13	54	1	10
1.2		3.0			
1.26e6	4.2e6				

Condition de temperature en profondeur

ZONE_TEMPERATURE_NORD					
54					
1	18	1	10		
8.0					

Condition de flux de chaleur entrant dans le sol

ZONE_FLAUX_CHALEUR_SUD					
1					
1	18	1	10		
TRANSYS					
1					
1					

Conduits d'air

Conduit 1

```
CONDUIT_z
8      11      13      16      1      10
1025.0 1.18    26.3e-3 15.89e-6      22.5e-6
0.2    0.25
23.43
TRNSYS
2      3      4      1.0
2      3      4
```

Conduit 2

```
-----
CONDUIT_z
8      11      29      32      1      10
1025.0 1.18    26.3e-3 15.89e-6      22.5e-6
0.2    0.25
23.43
TRNSYS
5      6      7      1.0
5      6      7
```

#####  
Condition de flux de chaleur bidon servant a envoyer a TRNSYS la  
temperature moyenne du sol sur la ligne longeant l'axe des z sur  
la paroi adiabatique a une profondeur de 630 mm Tsol. Le flux de  
chaleur fournit par TRNSYS doit etre egale a zero. Biko retournera  
la temperature moyenne de la surface sur laquelle ce flux nul  
(n'ayant aucune influence) est impose.

ZONE\_FLUX\_CHALEUR\_EST

```
18
22      23      1      10
TRNSYS
8
8
```

#####  
Fin du modele

FIN

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] QUÉBEC, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation, Direction des études économiques, Service des analyses sectorielles, éd. (nov. 1992) *SITUATION DE L'INDUSTRIE SERRICOLE AU QUÉBEC*, Québec, 105 p.
- [2] LAROCHELLE, R., LESSARD, J.-P., Québec, Ministère des ressources Naturelles du Québec, bureau de l'efficacité énergétique (mars 1994) *DES TOMATES ET DES PLANTES MOINS « ÉNERGIVORES »*, La Maîtrise de l'énergie, p.18-19.
- [3] CANADA, Agriculture Canada (1987) *Les économies d'énergie dans les serres urbaines au Canada, construction et exploitation*, s.l., Normand Rousseau, 82 p.
- [4] GAUTHIER, C. (1996) *Biko –théorie, fonctionnement, exemples d'utilisation-*, Version 2.5t, document du groupe THERMAUS, Université de Sherbrooke, (s. éd.), 85 p.
- [5] LEMAY, P. (1996) *SIMULATION DYNAMIQUE DES ECHANGES THERMIQUES A L'INTERIEUR D'UNE SERRE*, mémoire M.Sc.A., Sherbrooke, Université de Sherbrooke. 106 p.
- [6] SANTAMOURIS, M., BALARAS, C.A., DASCALAKI, E., VALLINDRAS, M. (1994) *Passive solar agricultural greenhouses : a worldwide classification and evaluation of technologies and systems used for heating purposes*, Solar Energy, vol. 53, no 5, p.411-426.
- [7] BERNIER, H. (1987) *ENERGY CONSERVATION USING A SOIL HEAT EXCHANGER-STORAGE SYSTEM IN A COMMERCIAL TYPE GREENHOUSE*, M.Sc. Thesis. Montréal, Université McGill, 145 p.
- [8] BERNIER, H., RAGHAVAN, G.S.V., PARIS, J. (1990) *Evaluation of a soil heat exchanger-storage system for a greenhouse. Part II : Energy savings aspect*, Canadian Agricultural Engineering, 33 :000-000, p.99-105.
- [9] GAUTHIER, C., LACROIX, M., BERNIER, H. (1997) *Numerical simulation of soil heat exchanger-storage systems for greenhouses*, Solar Energy, Vol. 60, No. 6, pp.333-346.
- [10] GAUTHIER, C. (1994) *Transfert de chaleur et d'humidité dans le sol*, Rapport interne. Groupe de recherche THERMAUS, Département de génie mécanique, Université de Sherbrooke.
- [11] PURI, V.M. (1986) *Feasibility and performance curves for intermittent earth tube heat exchangers*, American society of Agricultural Engineering, vol. 29, p.526-532.

- [12] DE VRIES, D.A. (1975) *Transfer process in plant environment*, Heat Transfer in Soil, Heat and Mass Transfer in the Biosphere, D.A. de Vries and N.H. Afgan (Eds) Vol.1, Script a Book Company.
- [13] LE COMITÉ DE RÉFÉRENCES ÉCONOMIQUES EN AGRICULTURE DU QUÉBEC : Québec, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Société du crédit agricole Canada, Office du crédit agricole du Québec, Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation, Université Laval (septembre 1987) *Chauffage des serres – Consommation annuelle de combustibles*, s.l., Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 14 p.
- [14] AEA INDUSTRIAL TECHNOLOGY (1992), FLOW3D, *Release 3.2 : User Manual*. Harwell Laboratory, Oxfordshire, UK.
- [15] Sibley, K.J., Raghavan, G.S.V. (1984) *Heat transfer coefficients for air flow in plastic corrugated drainage tubes*. Canadian Agricultural Engineering 26, pp.177-180.
- [16] KLEIN, S.A. et al. (1990) *ENGINEERING EXPERIMENT STATION REPORT 38-13, TRNSYS, A TRANSIENT SYSTEM SIMULATION PROGRAM*, Madison, version 13.1, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin—Madison, EX 13- 13 p.
- [17] KNIGHT, K.M., KLEIN, S.A., DUFFIE, J.A. (1991) *A Methodology for the Synthesis of Hourly Weather Data*, to be published in Solar Energy.